

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
MADRID**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ICAI)  
Departamento de Electrotecnia y Sistemas

**EXPLOTACIÓN ÓPTIMA  
DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN  
DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**GILBERTO CARRILLO CAICEDO**

Tesis Doctoral



Madrid 1995

EXPLOTACIÓN ÓPTIMA DE UN  
SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA

Universidad Pontificia Comillas de Madrid

Colección Tesis Doctorales: Nº 112/1995

Rf. 21.614

TD-17

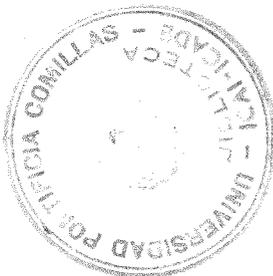
**UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
MADRID**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ICAI)  
Departamento de Electrotecnia y Sistemas

**EXPLOTACIÓN ÓPTIMA  
DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN  
DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**GILBERTO CARRILLO CAICEDO**

Tesis Doctoral



22 DIC. 1995

Madrid 1995

© Gilberto Carrillo Caicedo

Reproducción autorizada para el  
cumplimiento de los requisitos  
académicos: O.M. 17-9-1993, art. 9



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS  
MADRID

La Tesis Doctoral de D. GILBERTO CARRILLO CAICEDO

Titulada "EXPLOTACION OPTIMA DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCION  
DE ENERGIA ELECTRICA".

Director Dr.D. José Ignacio Pérez Arriaga

fue leida en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros  
Industriales de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS DE  
MADRID, el día 26 de julio de 1995, ante el tribunal constituido  
por los siguientes Profesores:

PRESIDENTE : Dr. D. José Cidrás Pidre  
VOCAL : Dr. D. Tomas Gómez San Román  
VOCAL : Dr. D. Ignacio Ramírez Rosado  
VOCAL : Dr. D. Carlos Roldán Porta  
SECRETARIO : Dr. D. Jaime Román Ubeda

y recibió la calificación de *APTO CUM LAUDE*

Madrid, a 14 de Noviembre de 1995  
EL SECRETARIO DEL TRIBUNAL



Nuestras horas son minutos  
cuando esperamos saber,  
y siglos cuando sabemos  
lo que se puede aprender.

.....  
Caminante, son tus huellas  
el camino y nada más;  
caminante no hay camino,  
se hace camino al andar.  
Al andar se hace camino,  
y al volver la vista atrás  
se ve la senda que nunca  
se ha de volver a pisar.  
Caminante, no hay camino,  
sino estelas en la mar.

.....  
Todo pasa y todo queda,  
pero lo nuestro es pasar,  
pasar haciendo caminos,  
caminos sobre la mar.

**Antonio Machado**



A Clara Inés, Paulo Nicolás y  
Paula Alejandra.

A Luis Jerónimo, María Alcira,  
Luis Joaquín, Helbert Antonio,  
María Inés, Julia Esperanza y  
Carmen Alicia.

A mis sobrinos.



---

## Agradecimientos

---

Es preciso, en los momentos en que la vía seguida alcanza su fin, recordar a quienes hicieron posible realizar ese tortuoso pero fructífero recorrido.

Quiero agradecer muy especialmente a las instituciones que me prestaron su esmerado apoyo tanto técnico como económico:

- A la Escuela de Electricidad, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander (E<sup>3</sup>T de la UIS) que me concedió una “Comisión de Estudios”.
- Al Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas (IIT de la UPCo) que me otorgó una “Beca de Investigadores en Formación”.
- A la empresa eléctrica IBERDROLA que me adjudicó una ayuda económica correspondiente a su “Programa de Ayudas a la Investigación Científica y al Desarrollo Tecnológico”.

Durante dicho recorrido muchas personas estuvieron siempre con la mano tendida. Gracias a esas manos amigas pude sobrellevar los momentos aciagos y avanzar hasta este punto. Estas manos pertenecen a:

- mi director de tesis: José Ignacio Pérez Arriaga,
- mis supervisores: Tomás Gómez San Román y Jaime Román Ubeda,
- mis compañeros: Juan Rivier Abbad, Juan Luis Zamora Macho, María Gómez Navarro y Antonio Muñoz San Roque,
- mis protectoras: Carmen Jiménez Bermejo y Pilar Barrado Moreno.

Existieron, además, otras manos amigas que desde Colombia atravesaron el océano para sostenerme en mi lucha. De éstas, debo mencionar las de:

- mi jefe: Alirio Cala Vecino,
- mis ex-jefes: Edgar Barrios Urueña, Francisco Antonio Rueda Patiño, Carlos María Gómez Rico y Roberto Martínez Angel,

- mis compañeros: Gabriel Ordoñez Plata, José Gabriel Plata Cordero, Julio Augusto Gélvez Figueredo y Hermann Raúl Vargas Torres.

Gracias por su compañía y apoyo, en estos adversos meses de soledad y esfuerzo, a Juan Diego Colegial (a quien le deseo que su trabajo sea fructífero), a mi correctora lingüística Clara Inés Wills y a quien me ofreció por las cibernáuticas ondas, su aliento y simpatía, Nahyr López Barbosa.

Gracias a mi familia ascendente que siempre me ofreció su incondicional respaldo y su inmensa confianza. Ellos son:

- mi padre: Luis Jerónimo, desde el Cielo,
- mi madre: María Alcira,
- mis hermanos: Luis Joaquín, Helbert Antonio, María Inés, Julia Esperanza y Carmen Alicia,
- mis sobrinos: Christian Alfonso, Helbert Ignacio, Martín Horacio, Luis Jerónimo, Judith Patricia, Juan Carlos, Dora del Pilar, Liliana María, Claudia Isabel, Luz Angela, Laura Margarita y Frank Darío,
- mis cuñados: Carlos Julio, María Isabel, Dora Judith y Orlando,
- mi familia adoptiva: Lisandro, Elvinia, Jairo, Iván, Graciela, Myra y Diego.

Nada habría hecho sin la compañía, cariño y comprensión de quienes tuvieron que soportar mi falta de dedicación en esta época, la cual espero subsanar de ahora en adelante. Gracias a ellos:

- mi esposa: Clara Inés,
- mis hijos: Paulo Nicolás y Paula Alejandra.

Además, es preciso recordar que en aquellos momentos difíciles en que sentía en carne propia las palabras de Rafael Pombo en “Hora de Tinieblas”:

Oh qué misterio espantoso  
es éste de la existencia,  
revélame algo conciencia,  
háblame Dios poderoso

llegaba una llamada de Gaby, una carta de mi madre, un mensaje de Clara, una misiva o demostración de mis Pauletes que me recordaban como dice muy acertadamente Violeta Parra:

Gracias a la vida que me ha dado tanto:  
me dio el corazón que agita tu marco;  
cuando miro el fruto del cerebro humano,  
cuando miro al bueno tan lejos del malo,  
cuando miro el fondo de tus ojos claros.

Gracias a la vida que me ha dado tanto:  
me ha dado la risa y me ha dado el llanto,  
así yo distingo dicha de quebrantos;  
los dos materiales que forman mi canto  
y el canto de ustedes que es el mismo canto  
y el canto de todos que es mi propio canto.

Gracias a la vida que me ha dado tanto.

Considero, sin embargo, imposible expresar mi agradecimiento a tantas personas que me motivaron, me ayudaron, me soportaron y me enseñaron. Lamento profundamente la omisión.

Quiero, finalmente, agradecerle a Dios su infinita bondad y recordar el hermoso sueño de R. Kipling:

Una noche soñé que caminaba a lo largo de una playa,  
acompañado por Dios.  
Durante la caminata muchas escenas de mi vida,  
fueron proyectándose en la pantalla del Cielo.

Según iba pasando cada una de esas escenas,  
notaba que unas huellas se formaban en la arena.  
A veces aparecían dos pares de huellas,  
en otras, solamente aparecía un par de ellas.

Esto me preocupó grandemente,  
porque pude notar que durante las escenas que reflejaban  
etapas tristes de mi vida,  
cuando me hallaba sufriendo de angustias, penas o derrotas,  
solamente podía ver un par de huellas en la arena.

Entonces le dije a Dios:  
*Señor, Tú me prometiste que si te seguía  
Tú caminarías siempre a mi lado.  
Sin embargo, he notado que durante los momentos*

*más difíciles de mi vida,  
sólo había un par de huellas en la arena.*

*¿Porqué cuando más te necesitaba  
no estuviste caminando a mi lado?*

El señor me respondió:

*Las veces que has visto sólo un par de huellas en la arena,  
hijo mío, ha sido cuando te he llevado en brazos.*

---

# Contenido

<b>Capítulo 1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
Motivación .....	3
Revisión Bibliográfica .....	5
Objetivo y Planteamiento de la Tesis .....	7
Organización de la Exposición .....	8
<b>Capítulo 2 Planteamiento propuesto</b> .....	<b>11</b>
Problemática de la explotación.....	13
Planteamiento del problema.....	15
Enfoque propuesto .....	20
<b>Capítulo 3 Marco regulatorio</b> .....	<b>25</b>
Introducción .....	27
Entidad reguladora .....	32
Planteamiento .....	32
Condiciones de optimalidad .....	35
Consumidor .....	40
Demanda.....	40
Planteamiento .....	41
Condiciones de optimalidad .....	44
Distribución-Red .....	48
Representación de la pérdida de suministro .....	49
Esquema regulatorio .....	52
Criterios de aplicación .....	55
<b>Capítulo 4 Optimización</b> .....	<b>59</b>
Introducción .....	61
Métodos electrotécnicos.....	64
Construcción.....	64
Destrucción .....	66
Permutación .....	67
Métodos naturales.....	69

---

<i>Simulated annealing</i> .....	69
Redes neuronales .....	71
Algoritmos genéticos .....	73
Análisis crítico .....	76
<b>Capítulo 5 Reconfiguración.....</b>	<b>79</b>
Introducción.....	81
Planteamiento .....	82
Definición de estado .....	82
Función objetivo .....	86
Método propuesto .....	89
Generalidades .....	89
Búsqueda global .....	90
Características de la implantación.....	93
Definición de la lógica <i>primero el mejor</i> .....	93
Búsqueda local.....	97
Criterios de truncamiento .....	98
Ejemplos de aplicación.....	100
Procesamiento paralelo.....	108
<b>Capítulo 6 Función de evaluación .....</b>	<b>113</b>
Introducción.....	115
Flujo de cargas radial .....	115
Generalidades .....	115
Método de Gauss-Seidel topológicamente orientado .....	117
Ejemplo.....	119
Flujo de cargas radial aproximado.....	122
Cálculo de precios puntuales .....	124
Generalidades .....	124
Expresiones de los precios puntuales .....	125
Algoritmo .....	127
Función de evaluación propuesta .....	128
<b>Capítulo 7 Implantación.....</b>	<b>133</b>
Introducción.....	135
Aspectos informáticos .....	135

---

---

Punteros .....	135
Generación de los alimentadores .....	139
Reconfiguración.....	141
Utilización .....	143
Generalidades. ....	143
Estrategia .....	147
Casos de aplicación .....	150
<b>Capítulo 8 Conclusiones .....</b>	<b>157</b>
Introducción .....	159
Conclusiones de la tesis .....	160
Globales .....	160
Específicas .....	161
Contribuciones de la tesis .....	164
Metodológicas .....	164
Específicas de implantación .....	167
Recomendaciones para futuros trabajos .....	167
<b>Apéndice 1 Definiciones topológicas.....</b>	<b>169</b>
<b>Apéndice 2 Ejemplos.....</b>	<b>173</b>
Introducción .....	175
Caso 1 Baldick.....	175
Caso 2 Dureza.....	176
Caso 3 Glamoc.....	177
Caso 4 Prueba.....	178
Caso 5 Contra .....	179
Caso 7 Conbas.....	181
Caso 8 Civani .....	182
Caso 9 BaraWu .....	183
Caso 10 Augugl.....	185
Caso 11 Au1000.....	186
Caso 12 Ejreal.....	194
<b>Glosario .....</b>	<b>205</b>
Mayúsculas .....	207

---

Minúsculas.....	208
Griegas.....	209
<b>Bibliografía .....</b>	<b>211</b>

---

# **Capítulo 1**

## **INTRODUCCIÓN**

---



---

## Motivación

---

El objeto de la tesis es el desarrollo de un método global de optimización de la explotación de una red de distribución, que tenga en cuenta el conjunto de las variables de decisión características y sea aplicable en esquemas regulatorios tanto tradicionales como de libre mercado, con énfasis en estos últimos.

Los sistemas de distribución han logrado un crecimiento y una complejidad enormes. La dificultad que esto impone ha hecho que en los últimos años se haya incrementado el número de estudios que pretenden mejorar su eficiencia. El control adecuado para que su forma de explotación sea segura, flexible, y eficaz es, en este momento, una necesidad.

El tema de la tesis adquiere una especial relevancia en la actualidad por la introducción de la problemática de competencia en la regulación de los sistemas eléctricos (una nueva ley eléctrica en Colombia, actualización de la ley en España, muchos otros países Latinoamericanos con sistemas de libre mercado de electricidad o en vías de adoptarlo, y el mundo en general siguiendo esa tendencia) y por la importancia creciente de la automatización de los sistemas de distribución, marco técnico en donde estaría inmersa la presente tesis.

En esta tesis se considera como sistema de distribución al conjunto de elementos que se conectan a la red de subtransmisión o reparto por intermedio de las subestaciones AT/MT y llevan la energía a través de los centros de transformación, a la red BT. Se ignora por tanto la red de distribución de BT.

La clasificación por niveles de tensión depende mucho del ente o persona que la haga, sin embargo los valores más comunes pueden ser:

- BT      menor de 1 kV.
  - MT      entre 10 y 20 kV (típicamente, la red de distribución que se explota radialmente).
  - AT      mayor de 20 kV (típicamente, la red que se explota en forma mallada).
-

El tratamiento de la explotación de la red de distribución debe tener en cuenta sus características especiales como son, típicamente:

- tener una configuración mallada que se explota radialmente,
- tener tomas en los transformadores AT/MT para controlar la tensión,
- tener bancos de condensadores para controlar las pérdidas de energía, y
- poder utilizar la interrupción de carga para reducir la demanda en zonas específicas del sistema en casos de necesidad.

Algunas de estas características se usan en varios estados de funcionamiento del sistema (alerta, emergencia), pero aquí se considera sólo el estado normal con miras a lograr la forma de explotación óptima.

La determinación de la explotación óptima de los sistemas de distribución es muy compleja por el elevado número de estados posibles del sistema, que depende de:

- La reconfiguración de alimentadores, realizada habitualmente en condiciones normales para balancear carga entre fases, para balancear carga entre alimentadores, y para reducir pérdidas, y en condiciones de emergencia para restaurar el servicio de las zonas donde sea posible.
- El cambio de las tomas de los transformadores de potencia (AT/MT), realizado para mantener la tensión en la red MT (15-20 kV) y para reducir pérdidas.
- La programación de condensadores, realizada para corregir el factor de potencia de la red, para mejorar el perfil de tensiones, para aumentar la capacidad de transporte y para reducir pérdidas.
- La gestión de la demanda, realizada para implantar programas de conservación de energía y de modificación de la curva de carga.

Como se puede observar, llevar a cabo estas políticas plantea conceptualmente la resolución de infinidad de estados del sistema y, como es lógico en estos casos, debe recurrirse a técnicas de optimización para lograr, no simplemente una solución, sino en lo posible, la mejor de ellas. El uso de técnicas de optimización como medio básico en la toma de decisiones complejas cuando se está realizando el diseño, la explotación o la

---

planificación de los sistemas eléctricos de potencia se ha convertido no ya en una conveniencia, sino en una exigencia.

El problema de optimización es muy sentido en distribución ya que allí no se dispone todavía de un método generalizado de modelado y análisis, a pesar de la existencia de una gran cantidad de publicaciones sobre el tema.

---

## Revisión Bibliográfica

---

Algunos problemas de la explotación óptima ya han sido estudiados ampliamente, es el caso por ejemplo de la compensación de reactiva, el de la reconfiguración, y el de la gestión de carga. Otros por el contrario, como la inclusión dentro del proceso de optimización de tarifas o precios puntuales, o las tomas de los transformadores como variables de decisión, hasta ahora no han comenzado a ser considerados.

La búsqueda de la configuración que permita optimizar la explotación comienza con trabajos como el de [Merlin-75], quien plantea una condición de optimalidad global que se resuelve por el método conocido como "*Branch & Bound*". En este caso, el problema se centra en determinar el estado (abierto / cerrado) de los elementos de la red de tal manera que su configuración sea radial, es decir que no existan elementos aislados, y que las pérdidas sean mínimas.

Los métodos que posteriormente han sido normalmente utilizados se pueden clasificar como "electrotécnicos" y "naturales". Los primeros pueden seguir tres estrategias:

- La "estrategia destructiva", que consiste en considerar la red mallada inicialmente, y por ejemplo ir abriendo la rama (perteneciente a un lazo) con la menor corriente hasta dejar la red completamente radial. Siguiendo esta estrategia, [Céspedes-85, Lakervi-89, Shirmohammadi-89, Roldán-93 y Borozan-95] proponen la acción de apertura basada en heurísticos diseñados con base en la disminución de las pérdidas y/o en la experiencia.
  - La "estrategia constructiva", esto es, conectar la rama (dentro de las factibles) que implique por ejemplo, las menores pérdidas, hasta tener todos los nudos energizados, como lo propone [Glamocanin-90]
-

- La “estrategia de permutación” que consiste en basarse en una configuración factible inicial e ir alterándola paso a paso hasta que la función objetivo no mejore, como lo proponen [Civanlar-88, Castro-89, Baldick-91, Harnisch-91].

Los métodos “naturales”, llamados así por asimilarse a alguna forma de comportamiento presente en la naturaleza, generan en cada paso configuraciones factibles que se evalúan y clasifican, manteniendo en el proceso sólo aquellas con unas características consideradas aceptables, como es el caso del *Simulated Annealing* (inspirado en el tratamiento de materiales) [Hasselfield-90, Chiang-90, Nara-91, Cherkaoui-92 y Chang-94], de los Algoritmos Genéticos (asociado a la reproducción de los seres vivos) [Nara-92] y de las Redes Neuronales [Kim-93].

Los fundamentos analíticos de la localización de condensadores se pueden encontrar en [Neagle-56]. [Cook-61] extendió la formulación para incluir la reducción de las pérdidas de energía y el pico de potencia. [Durán-68], explotando la naturaleza discreta de los bancos de condensadores, propuso un modelo más realista del alimentador considerando las cargas concentradas y, resolviéndolo por programación dinámica. Y, por su parte, [Fawzi-83] incorporó los kVA liberados y el incremento de la tensión en el modelo. Más recientemente, debido al auge de la automatización y el control de la distribución, se han generado nuevos estudios: [Grainger-81, Lee-81, Grainger-82, Grainger-83, Civanlar-85]. En ellos, se desarrollan métodos computacionalmente muy eficientes que resuelven el problema por programación no lineal. Finalmente, [Baran-89] aplicó técnicas de descomposición para acelerar la solución.

Los métodos de gestión de la carga se han desarrollado mucho en los últimos años. Inicialmente sólo se realizaba la desconexión de carga en condiciones de emergencia (*load shedding*). Luego se pasó al control de la potencia consumida a través de una variación (normalmente reducción) ligera de tensión (2,5 ó 5%) en el alimentador para disminuir pérdidas [Chen-84]. Posteriormente, este método se amplió para la realización de contratos, por los cuales se permitió fijar tarifas reducidas a costa de poder desconectar carga del usuario de acuerdo con las necesidades de la empresa eléctrica y bajo determinadas condiciones [Mortensen-90, Álvarez-90]. Actualmente, se propone controlar la carga indirectamente a través de precios [Lo-91] o modificar la carga o sus atributos para mejorar la eficiencia del sistema a partir de programas más sofisticados de gestión de demanda [Sioshansi-92, Goldman-93].

Las señales de precios son conceptualmente el método más avanzado de gestión de la demanda. [Murphy-94] propone una forma desacoplada de calcular los precios puntuales en los alimentadores de distribución y, analiza la forma de considerar las restricciones de red.

[Peponis-95] intenta integrar el tratamiento de la explotación óptima de la distribución al incluir en el análisis el despacho de potencia reactiva y la reconfiguración de alimentadores en la minimización de pérdidas activas.

---

## **Objetivo y Planteamiento de la Tesis**

---

El objetivo de esta tesis es el desarrollo del método y de los procedimientos de cálculo que permitan a una compañía distribuidora tomar las decisiones de explotación que conduzcan a la optimización de su función de beneficio de acuerdo con la regulación vigente, ya sea de carácter tradicional o competitivo. En este proceso se incluyen tanto las prácticas usuales de operación como la reacción de la carga a los precios de la energía o de la potencia.

Lo anterior corresponde a una significativa ampliación del horizonte de la optimización de la distribuidora, ya que en vez de reducirse a las pérdidas óhmicas, como ha sido tradicional, pueden incluirse por ejemplo los beneficios netos derivados de la compra de energía al por mayor en distintos nudos de la red y de su venta a los consumidores finales o pueden seguirse otras consideraciones.

El planteamiento general se puede expresar como la optimización de una función objetivo determinada sujeta a una serie de restricciones. El enfoque propuesto se puede ver en la Figura 1.1.

En ella se representa el ámbito de decisiones de una compañía eléctrica que busca optimizar la explotación teniendo en cuenta tanto los elementos de control electrotécnicos como las consideraciones económicas y los patrones de conducta del consumo. Como se muestra, la carga debe modelarse con tres formatos diferentes, de acuerdo con su opción de control. Una parte de la carga no es controlable en el proceso y se considera carga estática o carga base. Otra parte, mostrada como de control directo, se puede conectar y desconectar desde la empresa de acuerdo con el contrato suscrito

---

con el usuario y con las necesidades de la empresa y la última corresponde a la carga gestionada por el propio usuario como reacción a los precios establecidos en cada momento.

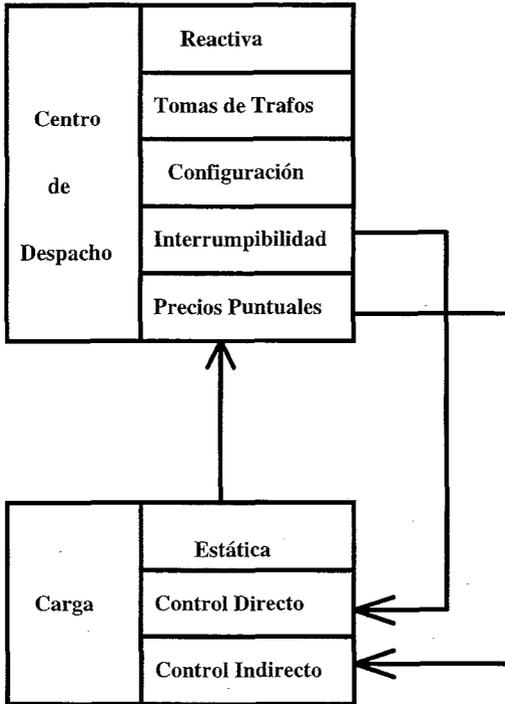


Figura 1.1. Proceso global de optimización

---

## Organización de la Exposición

---

El planteamiento global propuesto en esta tesis se presenta en el capítulo 2. En éste, se describe la problemática de la explotación, se realiza el planteamiento del problema y, se propone un enfoque de solución.

En el capítulo 3 se establece un marco regulatorio para la red de distribución, planteando el problema en función del bien común y luego estableciendo las

---

condiciones que deben satisfacer tanto el consumidor como la empresa que controla la red para que actúen en la dirección de promover el beneficio global.

El capítulo 4 contiene la revisión y el análisis de los métodos empleados en la reconfiguración de los alimentadores de distribución. El capítulo 5 presenta el método de reconfiguración propuesto en esta tesis.

En el capítulo 6 se detalla el procedimiento desarrollado para la evaluación de la función objetivo, específicamente considerando el método de solución del flujo de carga radial y la forma de cálculo de los precios puntuales.

El capítulo 7, por su parte, describe las características de los algoritmos de implantación que han sido utilizados y los casos ejemplo.

En el capítulo 8 se presentan las conclusiones, las aportaciones de la tesis y las recomendaciones para el desarrollo de futuros trabajos.

Finalmente, el apéndice 1 recoge las definiciones topológicas más importantes y el apéndice 2 los datos de los ejemplos considerados.



---

# **Capítulo 2**

# **PLANTEAMIENTO**

# **PROPUESTO**

---



---

## Problemática de la explotación

---

Las posibilidades de explotar los sistemas de distribución dependen, por supuesto, de las variables que identifican el estado del sistema y de la gama de valores que pueden tomar. Las variables de decisión consideradas en general en esta tesis se refieren a la configuración de la red, a los bancos de condensadores, a las tomas de los transformadores de alimentación y al control directo o indirecto de las cargas.

En condiciones normales de operación, los alimentadores de distribución deben estar conectados de tal forma que satisfagan la factibilidad topológica, esto es, que cumplan dos condiciones: 1) alimentar toda la carga exigida y 2) no tener ningún lazo cerrado. Las redes tienen algunos elementos redundantes que permiten cambiar dicha conexión manteniendo la factibilidad. Este cambio se conoce como **reconfiguración** y está determinada por los elementos que se dejan abiertos, los **enlaces** (ver las definiciones topológicas en el apéndice 1).

Una red con  $n$  nudos (sin contar el nudo de referencia) sólo necesita  $n$  elementos para formar una red conectada (todos los nudos alimentados). Cualquier elemento adicional será redundante pues no será estrictamente necesario para que todos los nudos estén conectados. Por esta razón, una red con  $n$  nudos y  $e$  elementos, tiene  $l=e-n$  elementos redundantes que se deben dejar abiertos para que la red sea radial (con una sola dirección de alimentación). La configuración de trabajo sólo es una de las  $(e!./n!)/n!$  posibilidades de conectar  $n$  elementos de  $e$  posibles.

El despacho de los bancos de condensadores corresponde a la conexión de etapas de potencia reactiva (kVAR), las cuales se conectan de acuerdo con el consumo existente aguas abajo. De esta manera, se mejora el perfil de tensiones, se disminuyen las pérdidas y se aumenta la capacidad de transporte. Por tanto, las posibilidades de conexión de cada banco estarán dadas por su número de etapas. Así, si la red tiene  $nc$  nudos con bancos de condensadores y cada banco  $i$  tiene  $m_i$  etapas, el número de opciones de conexión estará dado por  $\prod_i^{nc} m_i$ .

El cambio de la relación de transformación de los transformadores de potencia se puede usar para controlar la tensión e incluso para reducir pérdidas. Esto, se hace

---

cambiando la toma del transformador correspondiente. Si la red tiene  $nS/E$  subestaciones y cada transformador  $j$  tiene  $t_j$  tomas, las opciones de control por este medio serán  $\prod_j^{nS/E} t_j$ .

Una evaluación exhaustiva de posibilidades, tomando sólo estos tres medios de control (sin incluir las variables de decisión asociadas a la carga), implicaría la consideración de  $((e!)/n!)$ ,  $(\prod_i^{nc} m_i)$ ,  $(\prod_j^{nS/E} t_j)$  situaciones de explotación distintas.

Para una red de 47 elementos, 40 nodos, 4 subestaciones de alimentación con transformadores de 7 tomas y 8 bancos de condensadores de 3 etapas, se tendrían un total de  $2,52 \cdot 10^{22}$  posibilidades. Por lo cual, teóricamente si se evaluara un millón de alternativas por segundo se necesitarían  $7,98 \cdot 10^8$  años en analizarlas todas.

Como se puede observar, y a pesar de no renunciarse *a priori* a la obtención del óptimo, es necesario utilizar algún procedimiento que permita reducir drásticamente el número de situaciones a considerar para pretender solucionar el problema aceptablemente.

Asegurar la factibilidad de la condición de operación es un problema añadido. La factibilidad se puede perder por la aparición de lazos o de islas en la red (este caso se referirá en adelante como *infactibilidad topológica*) o por la violación de las restricciones físicas de operación de la red (este caso se referirá en adelante como *infactibilidad de explotación*).

Para modelar el problema de la explotación óptima, resulta pertinente descomponerlo en un conjunto ordenado de subproblemas, reducir el campo de soluciones y establecer una estrategia de búsqueda que permita lograr con relativo éxito la consecución del óptimo.

Una consideración a analizar especialmente es la relación entre los objetivos de la explotación de la red y la normativa regulatoria existente. Esta relación es determinante en el comportamiento de los entes involucrados en el proceso, a saber: la entidad reguladora, la empresa encargada del despacho de la red de distribución y el conjunto de consumidores.

Los intereses de las partes dependen de las políticas establecidas por la regulación. Por ejemplo, si el consumidor paga una tarifa fija sin importar las condiciones existentes en la red en ese momento, demandará unas potencias de acuerdo con sus propias necesidades sin importarle si la red está sobrecargada o completamente descargada. Por el contrario, si la tarifa, cuando la red está descargada, es mucho más baja que cuando está saturada, el consumidor tratará de cambiar sus patrones de uso en relación con la operación para sacar provecho de esa diferencia.

Por otra parte, si a la empresa que realiza el despacho se le remunera más cuando la red está saturada que cuando funciona bien, tenderá a programar su funcionamiento en forma errónea para percibir más ingresos. Por el contrario, si se le dieran incentivos económicos de acuerdo con la calidad ofrecida (o los ahorros conseguidos en el corte de suministro), tenderá a realizar un mejor despacho para mejorar su remuneración.

Nótese que en general es diferente la especificación de la explotación óptima cuando se contempla desde el punto de vista de la empresa que cuando se hace desde el punto de vista del consumidor o del bien común. Además, optimizar beneficios o costes es diferente en general que optimizar pérdidas de potencia o calidad del suministro.

La búsqueda del óptimo tiene que enfrentar muchas condiciones, restricciones y dificultades en general que hacen de éste un problema difícil de resolver pero, por esa misma razón, altamente interesante.

---

## **Planteamiento del problema**

---

El problema de optimización de la operación de un sistema eléctrico se ha planteado y resuelto satisfactoriamente (conceptualmente al menos) a nivel de transporte y generación, pero a nivel de distribución sólo existen soluciones parciales. Un planteamiento global que permita desarrollar un método definido con los correspondientes algoritmos para su resolución, aún no ha sido formulado.

La optimización de la explotación de la distribución conceptualmente requiere, como se expresó en el párrafo anterior, la consideración de muchas soluciones posibles debido al número de alternativas de despacho de condensadores y tomas de transformadores, a las posibilidades de variación de la carga, a las diferentes opciones

---

de reconfiguración, etc., habiéndose de escoger de entre todas esas soluciones, la mejor posible.

En este sentido, la presente tesis plantea la extensión tanto en el contexto tradicional como en el de un mercado eléctrico competitivo, de la filosofía básica tradicional de la explotación óptima de un sistema de generación y transporte (el flujo de carga óptimo), al ámbito de la red de distribución. La naturaleza de las variables de decisión y la incidencia del marco regulatorio hacen que el problema de la explotación óptima de la red de distribución sea muy diferente.

La tesis, por tanto, plantea el enfoque global y los procedimientos de cálculo que permitirían a una compañía distribuidora tomar las decisiones de explotación, incluyendo en estos tanto las prácticas usuales de operación como el control directo o indirecto de las cargas y su reacción a los precios de la energía, de tal forma que le conduzcan a la optimización de su función de beneficio de acuerdo con la regulación vigente, ya sea de carácter tradicional o competitivo. La tesis solamente, desarrolla, en detalle los procedimientos que corresponden a un subconjunto de las variables de decisión.

El enfoque anterior corresponde a una significativa ampliación del horizonte de optimización de la distribuidora pues, en vez de reducirse a las pérdidas óhmicas, como ha sido tradicional, pueden incluirse entre otros, los beneficios netos derivados de la compra de energía al por mayor en distintos nudos de la red y de su venta a los consumidores finales, o seguir otras consideraciones.

En los procedimientos de cálculo implantados se saca provecho de la forma radial como se realiza la explotación de las redes de distribución, con el objeto de hacer un uso racional de los recursos computacionales.

El planteamiento general ha de corresponder a la maximización de los beneficios globales netos de explotación, satisfaciendo las restricciones técnicas. Sin embargo, otras formas de considerar el problema pueden ser: la minimización de los costes netos de explotación incluyendo, en caso de existir, multas a la empresa por cortes de energía y/o tarifas por potencia reactiva, la minimización de los costes de energía pagados por los usuarios o, muchas otras dependiendo de los intereses generales o particulares de los entes implicados.

---

La optimización se ha de realizar cumpliendo:

- Las ecuaciones nodales, esto es, mantener la potencia (activa y reactiva) entregada por cada subestación de potencia (ver Figura 2.1) igual a la suma de las potencias (activas y reactivas, respectivamente) transportadas por los alimentadores que parten de ella. Si las potencias activa y reactiva de la subestación  $i$  se llaman  $PT_i$  y  $QT_i$ , respectivamente y las de cada alimentador  $j$  conectado a la subestación referida se llaman  $PA_j$  y  $QA_j$ , la relación entre ellas se puede representar como:

$$PT_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \in i}}^{nA_i} PA_j \tag{1.a}$$

$$QT_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \in i}}^{nQ_i} QA_j \tag{1.b}$$

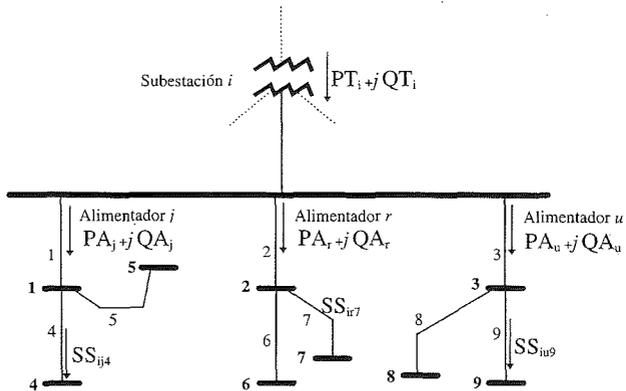


Figura 2.1. Red ilustrativa de la nomenclatura utilizada.

Y, definiendo la potencia acumulada en el tramo  $l$  del alimentador  $j$  perteneciente a la subestación  $i$  (ver por ejemplo en la Figura 2.1  $SS_{ij4}$  y  $SS_{uv9}$ ) como:

$$SS_{ijl} = PR_{ijl} + j \cdot QR_{ijl} .$$

se pueden expresar las potencias activa y reactiva en cada tramo de línea ( $PR_{ijl}$  y  $QR_{ijl}$ ) como la suma de las potencias de los tramos conectados a él con la carga

conectada en el nudo asociado (nótese que para la potencia reactiva es necesario restarle la potencia reactiva generada por los condensadores en dicho nudo como se observa en la expresión 2). Esto es:

$$PR_{ijl} = \sum_{k \in g(l)} PR_{ijk} + r_{ijk} \frac{PR_{ijk}^2 + QR_{ijk}^2}{V_{ijk}^2} + P_{ijk} \quad (2.a)$$

$$QR_{ijl} = \sum_{k \in g(l)} QR_{ijk} + x_{ijk} \frac{PR_{ijk}^2 + QR_{ijk}^2}{V_{ijk}^2} + Q_{ijk} - QC_{ijk} \quad (2.b)$$

donde  $r_{ijk}$ ,  $x_{ijk}$ ,  $V_{ijk}$ ,  $P_{ijk}$ ,  $Q_{ijk}$ , y  $QC_{ijk}$  son la resistencia y reactancia del tramo asociado con el nudo  $ijk$ , y la tensión, potencia activa y reactiva consumidas y reactiva generada en el correspondiente nudo, respectivamente.  $g$ , por su parte, es la función que expresa la conexión del tramo, es decir:

$$g(l) = \{g \mid g \text{ esté conectado aguas abajo de } l\}$$

- Los límites de capacidad de la subestación AT, lo que equivale a decir que la potencia aparente exigida a la subestación debe ser menor que su potencia nominal (expresión 3).

$$Capac_i^2 \geq PT_i^2 + QT_i^2 \quad (3)$$

- La existencia de la correspondiente etapa en el banco de condensadores del correspondiente nudo (expresión 4); donde  $netc$  es el número de etapas del banco de condensadores correspondiente.

$$QC_{ijk} \in \{QC_1, QC_2, \dots, QC_{netc}\} \quad (4)$$

- Los límites térmicos de las ramas. Esto es, que la potencia aparente que transportan las ramas debe ser menor que la que puede soportar la línea sin sobrepasar su temperatura máxima de funcionamiento, como se muestra en la expresión (5).

$$Termr_{ijk} \geq PR_{ijk}^2 + QR_{ijk}^2 \quad (5)$$

- La radialidad. Es decir, que a pesar de la configuración mallada de la red ésta debe explotarse de manera que cada punto de carga sólo tenga una vía de alimentación. Esto se puede expresar en forma simbólica como en la expresión 6, asegurando que sólo existe un enlace por cada lazo básico (ver apéndice 1). La aplicación práctica se ha implantado sin embargo, con punteros de conectividad como se muestra en el capítulo 7.

$$\sum_{i=1}^{nlazos} \left( \prod_{j=1}^{nelem_i} esw_{ij} \right) = 0 \tag{6}$$

$$\sum_{j=1}^{nelem_i} \overline{esw}_{ij} = 1 \quad \forall i$$

siendo  $esw_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si el elemento } j \text{ del lazo básico } i \text{ está abierto} \\ 1 & \text{si el elemento } j \text{ del lazo básico } i \text{ está cerrado} \end{cases}$

y  $\overline{esw}_{ij}$  es el complemento de  $esw_{ij}$ . Además, el número de lazos y de elementos se expresan como  $nlazos$  y  $nelem$  respectivamente.

- Las restricciones de interrumpibilidad (expresión 7), tratadas ampliamente en [Gabaldón-92], se podrían modelar en forma aproximada por las condiciones: a) la carga interrumpida debe ser menor que o igual a la contratada como tal (expresión 7) y, b) el número máximo de interrupciones contratado por año no se debe superar. (Para incluirlo en el estudio diario, se le podría imponer un peso mayor a la restricción a medida que el número acumulado en el año se vaya acercando al límite, ver expresión 8). En el momento de considerar estas condiciones, resulta importante tener en cuenta la recuperación de la carga después del corte, lo cual se hará reconociendo el cambio de la medida de la diversidad conocida como factor de diversidad (ver expresión 9).

$$PINT_{ijk} \leq PCONINT_{ijk} \tag{7}$$

$$tacum_{ijk} + \alpha \cdot \sum e_{ijk} \Delta t \leq t \text{ int}^+_{ijk} \tag{8}$$

$$FDIV(t + \Delta T) = FDIV(t) * b \tag{9}$$

( $b$  = Factor de recuperación     $a$  = Factor de peso)

- Los límites de tensión, esto es, que la tensión se mantenga dentro de los valores de regulación preestablecidos en todos los nudos (expresión 10) y que las tomas programadas para los transformadores de potencia correspondan a las tomas existentes en ellos, como se muestra en la expresión 11 ( $\sigma$  es la máxima desviación aceptable de tensión y  $reg$  es la regulación aceptada en pu).

$$V_{ijk} = V_{ijk}^0 (1 \pm \sigma) \quad \sigma \leq reg \quad (10)$$

$$t_{ijk} \in \{t_1, t_2, \dots, t_{ntoma}\} \quad (11)$$

- La dependencias de la carga, esto es, considerar en el modelo eléctrico la posible variación de la carga con la tensión, y en el modelo funcional la interrumpibilidad (expresiones 7, 8 y 9) y la elasticidad al precio pagado por la energía (expresiones 12).

$$P_{ijk} = P_{ijk} (P_{ijk}^0, V_{ijk}, \dots, Tarifa_{ijk}) \quad (12.a)$$

$$Q_{ijk} = Q_{ijk} (Q_{ijk}^0, V_{ijk}, \dots, Tarifa_{ijk}) \quad (12.b)$$

Las variables de decisión que determinan la condición óptima de la red corresponden a la situación de apertura o cierre de los tramos de red, a los bancos de condensadores, a los transformadores de potencia y a la carga (posibilidad de interrupción directa y respuesta a los precios puntuales).

---

## Enfoque propuesto

---

En este apartado se describe cómo se propone abordar la obtención de la explotación óptima de la distribución.

El problema es realmente complejo en vista del número de variables independientes de desigual naturaleza e importancia, de las características relacionadas con dichas variables (naturaleza continua o discreta, funciones no lineales, ...), del elevado número de restricciones, de los procesos lentos de cálculo, etc.

---

Para realizar el proceso más eficientemente, se propone tratarlo en dos formas diferentes, **por fases** que corresponden a la precisión (y completitud) con que se ataca el problema y **por etapas** que corresponden a la secuencia de resolución en forma similar a la descrita en [De cuadra-90]. La primera fase se realiza con poca precisión y exhaustivamente (visión rápida de todas las posibilidades), mientras que en la segunda y posteriores se incrementa la precisión y el alcance se hace menos exhaustivo (ver Figura 2.2).

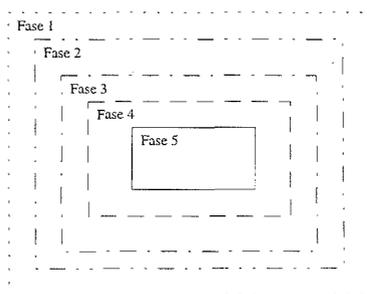


Figura 2.2. Proceso de evaluación por fases.

Las etapas implican hacer primero un proceso y luego otro, como se muestra en la Figura 2.3.

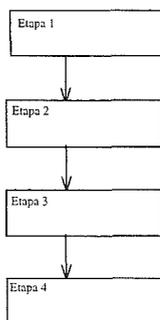


Figura 2.3. Proceso de evaluación por etapas.

Las fases se realizan para acercarse a la solución y disminuyen el campo de búsqueda mientras mejoran la precisión de los cálculos realizados. En cada fase se resuelve el

proceso de optimización completo. A medida que se avanza, entonces, se mejora el modelo de cálculo y por tanto la solución obtenida.

Para modelar el problema es necesario determinar tres cosas diferentes: un proceso de evaluación, una estrategia de búsqueda y un criterio de selección (o función objetivo). El modelo se realiza para el caso más general, con el máximo nivel de detalle posible, y representado formalmente. Por tanto, es importante identificar tanto todos los atributos y todas las restricciones, como todos los procesos de cálculo exhaustivamente. Realizado este paso, se unen todos los procesos de cálculo en un proceso de evaluación.

El problema específico considerado en la tesis contiene características altamente discretas (reconfiguración), discretas (despacho de condensadores y tomas de los transformadores), continuas (potencias) y procesos no lineales (flujo de carga). Estas características motivan la estructuración del proceso de resolución en forma jerarquizada y permiten que el mismo siga, en lo posible, la secuencia siguiente:

- Una primera etapa que resuelve el problema altamente discreto de la configuración óptima, considerando las cargas en forma estática y las demás variables de control en forma continua (el plan maestro es determinado por esta etapa). En esta tesis esta suboptimización se ha realizado por programación heurística entera, a través de la utilización de un algoritmo de búsqueda que ha requerido mucha adaptación para utilizarlo aquí, y que se puede encontrar en [Morelato-89, Latorre-93] para resolver el problema de restauración del suministro y planificación de la red de transporte, respectivamente.
  - Una etapa que soluciona, por el método de "*Branch & Bound*", el problema discreto de programar las tomas de los transformadores y los condensadores. Para esta fase se consideran fijas tanto la configuración óptima encontrada en la fase anterior como la carga.
  - Una última etapa en la cual se considera la gestión directa que puede hacer la empresa de la carga. Este control directo de la carga debe haberse convenido con la empresa eléctrica a través de contratos de interrumpibilidad, los cuales consisten en que el usuario permite a la empresa la interrupción directa, total o parcial de su carga a costa de una reducción en la tarifa. Aquí se propone analizar también la gestión indirecta de la carga a través de la tarificación puntual. Esto
-

corresponde a enviar señales más prácticas de precios al usuario, motivándolo (gestión indirecta) a que, buscando su propio beneficio, contribuya a la optimización global del sistema.

Con esta idea se planteó la resolución global en la forma mostrada en la Figura 2.4. Aquí, adicionalmente, se separan las características relacionadas con la forma de explotación de la red (área sombreada) de las características relacionadas con la carga (aunque dependa de acciones realizadas en el centro de despacho).

La explotación óptima de la red de distribución corresponde a optimizar la función objetivo que se le haya fijado en la regulación específica, satisfaciendo así las restricciones de capacidad y de topología.

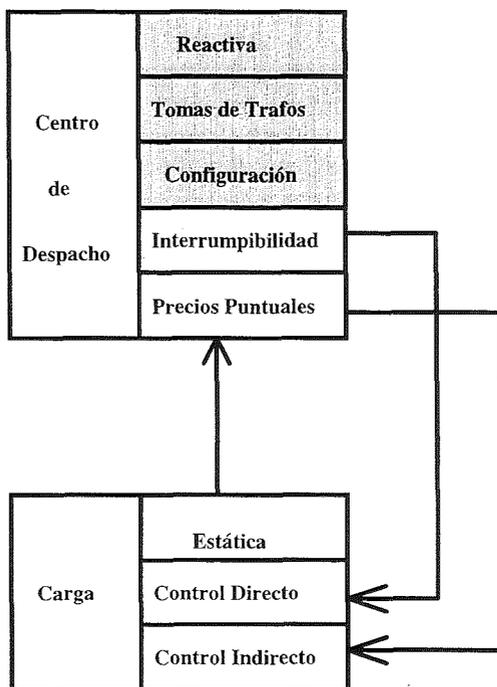


Figura 2.4. Proceso de optimización

El proceso global de solución se muestra en la Figura 2.4 (ver descripción en el capítulo 1); pero la aplicación informática realizada con el fin de mostrar la aplicabilidad del método, incluye la reconfiguración óptima (como medio más crítico para considerar la fase electrotécnica) realizada teniendo en cuenta los precios puntuales de las potencias activa y reactiva (como medio de considerar la fase económica del problema global).

---

---

**Capítulo 3**  
**MARCO**  
**REGULATORIO**

---



---

## Introducción

---

El sector eléctrico a nivel mundial está siendo objeto de una significativa transformación en su organización y funcionamiento, debido a los procesos de liberalización o desregulación emprendidos en muchos países. Este proceso enfatiza la eficiencia en la asignación de recursos y su correspondiente mejora en la capacidad de competir en una economía cada vez más abierta.

Debido a sus características particulares, la regulación de este sector es diferente de la de otros sectores de la economía. No es un sector en donde se puedan sustituir fácilmente los principios tradicionales de regulación por reglas de libre mercado (ver [CNE-94]) puesto que, entre otros aspectos:

- El capital invertido es muy elevado y la vida económica de las instalaciones es muy larga.
- Las redes de transporte y distribución son monopolios naturales, mientras que la generación y comercialización de energía pueden plantearse en términos de competencia.
- Existen externalidades en la explotación de los recursos naturales.
- Existe un potencial impacto ambiental elevado.
- Es primordial en el desarrollo económico y social de un país.

Las deficiencias operativas de la regulación tradicional, vigente o previa, se describen en forma diferente en los distintos países dependiendo de quién las formula. En algunos casos han estado ligadas a fenómenos de sobrecapacidad instalada, altos costes financieros o carencias del modelo regulatorio. En otros, han correspondido a déficits de generación o a errores de planificación por labores de gestión deficientes.

Un hecho que resulta indiscutible para el sector eléctrico es que está comenzando una etapa caracterizada por la instauración de una competencia creciente. Esto es válido para la generación y la carga, pero no para las funciones de la red a nivel del transporte y de la distribución, que se comportan como monopolios naturales. No se puede

---

pretender conseguir una competencia o una regulación perfectas, sino que se deben combinar hábilmente las cualidades de cada uno de los dos enfoques para obtener un comportamiento adecuado de los entes participantes.

La regulación en un marco regulatorio liberalizado se limita en general, por un lado, a proteger los intereses de los usuarios promoviendo mejoras en seguridad, precio y calidad en el ámbito donde el sistema mantiene características de monopolio natural, y, por otro, a promover la competencia en donde sea posible.

Los cambios regulatorios adoptados en el sector eléctrico generalmente se pueden caracterizar (ver [Pérez-Arriaga-91]) por: la introducción de competencia en la generación; el mayor acceso a la red de transporte por parte de los participantes en el mercado, la mayor integración de la demanda en las funciones de seguridad y gestión económica del sistema; la introducción de la función de comercialización en distribución y, la inclusión de consideraciones de impacto ambiental en toda la gestión del sector.

Estas transformaciones implican una revisión completa tanto en las funciones de explotación y planificación de los sistemas eléctricos como en los modelos, algoritmos, e implantaciones utilizados hasta ahora.

La aplicación de enfoques regulatorios de corte marginalista en el ámbito de la generación y transmisión ha sido tratada ampliamente, ver por ejemplo [Schweppe-88, Pérez-Arriaga-91, Rivier-91], pero en el ámbito de la distribución, donde algún caso puntual es [Murphy-92, Lo-93], ha sido menos frecuente. Una estrategia más amplia es, sin embargo, necesaria.

El contexto regulatorio tradicional, con criterios de escaso rigor económico, ha motivado el establecimiento de tarifas uniformes para grandes grupos de usuarios. En la actualidad, con el establecimiento de sistemas de libre mercado en los sistemas mayoristas de generación y diversos desarrollos desreguladores en los sistemas de distribución, se vislumbra la conveniencia de establecer unos criterios básicos de regulación para motivar, en este contexto, la eficiencia del sistema y prevenir la aparición de esquemas de regulación que conlleven incentivos perversos.

---

La motivación de este cambio proviene por una parte de los nuevos esquemas regulatorios y, por otra, del cambio tecnológico que ha permitido que los medios relacionados con la automatización de la distribución sean cada vez más accesibles.

La tendencia actual más liberalizadora cuando se pretende plantear la regulación a nivel de distribución, es la de dividirla en dos áreas diferentes: un área que se puede considerar como “área de red”, y otra como “área de comercialización”. El primer área corresponde a la planificación y explotación de la red de distribución, para que cumpliendo requisitos de calidad y eficiencia, se permita el flujo de potencia de las instalaciones de suministro a las instalaciones de consumo. El segundo puede corresponder a la compra de energía al por mayor, la contratación de seguros de suministro y de precios (en entornos marginalistas), la gestión administrativa y contable, y/o aquellas acciones de gestión de demanda (incluyendo la contratación de tarifas específicas a consumidores finales) que permitan asegurar el precio de compra, la calidad de la energía, o la eficiencia en el uso de las instalaciones de consumo.

En este capítulo se pretenden establecer los fundamentos teóricos para la regulación del servicio de distribución y discurrir pautas para su implantación en casos reales. Para ello, se consideran como agentes involucrados: el ente regulador, la distribuidora, y el consumidor. El ente **regulador** es quien, teniendo como principio la búsqueda del bien común, debe diseñar la normativa que obligue a la distribuidora y a los consumidores a seguir la dirección de maximización del beneficio social neto (BSN). En otras palabras, el regulador debe establecer las condiciones a que se deben someter la empresa de distribución y los consumidores para que el BSN sea máximo. La empresa de distribución o distribuidora, considerada como **distribuidora-red** y **distribuidora-comercialización** asegura la prestación del servicio a los consumidores. Como distribuidora-red, teniendo características de monopolio y como distribuidora-comercialización, pudiendo estar expuesta a las condiciones de libre mercado. El **consumidor**, por su parte, pretende beneficiarse del uso de la energía eléctrica mediante la adquisición de la energía que requiere a las tarifas establecidas.

La regulación de la red de distribución es similar a la de la red de transporte, pues ambas se comportan como monopolio y sus características generales son las mismas. Es decir, tanto la red de distribución como la red de transporte deben invertir óptimamente.

---

En ambas, igualmente, se debe realizar la explotación de forma que los costes sean mínimos satisfaciendo las restricciones correspondientes de eficiencia y calidad de servicio.

La diferencia entre el transporte y la distribución se centra en los puntos siguientes:

- La operación óptima del sistema conjunto de generación y transporte debe orientarse a conseguir el mínimo coste de operación. No es obvio encontrar por analogía cual debe ser la regulación de la red de distribución en el ámbito de la operación. Es, por tanto, necesario conocer la función objetivo que la entidad reguladora debe imponer a la distribuidora-red para que conduzca a las expresiones de optimización de la explotación deseadas. Análogamente, es necesario conocer las condiciones que debe imponerle, en lo que respecta al diseño óptimo de la expansión de la red.
  - Los medios empleados para realizar la explotación son completamente diferentes. En el transporte, la topología en condiciones normales se mantiene estática y los flujos de potencia se reajustan mediante el control que se hace de la generación conectada. En distribución, la topología puede cambiar determinando básicamente la energía tomada de cada alimentador y, con ella se requiere también despachar los condensadores, las tomas de los transformadores, y la carga.
  - En el transporte la percepción que tiene la empresa de y hacia los consumidores (distribuidoras y muy grandes usuarios) es agregada. Por tanto, no es, directamente controlable u observable. En la distribución en cambio, el acceso de la empresa es siempre directo, por lo cual los programas de gestión de demanda, de interrumpibilidad, de tarificación, y de calidad tienen una aplicación directa e individual. Esto tiene muchas implicaciones: por una parte, se debe ser más cuidadoso en el momento de establecer incentivos adecuados cuando se quiere motivar determinados comportamientos (como la gestión de demanda). Por otra, la implantación de programas de incentivación o cambio pueden ser más costosos debido al factor multiplicador que tienen asociado.
  - Las entidades consumidoras en transporte pueden considerarse con características agregadas y similares, mientras que en distribución los consumidores individuales
-

finales pueden tener que representarse con características completamente diferentes, como por ejemplo:

- ◆ Estar sometidos a un diferente sistema de tarificación (uno, basado en precios puntuales para los grandes consumidores y otro, con precios fijos para los demás).
- ◆ Tener diferente elasticidad demanda-precio (unos, que mantienen su demanda sin importar el precio, mientras que otros son muy sensibles al precio).
- Mientras que en el mercado mayorista los costes de instalación de elementos de medida y comunicación, los cuales permiten establecer el esquema de tarificación puntual a sus usuarios, parecen muy fácilmente justificables, en la distribución pueden ser disuasorios.

Para establecer el modelo regulatorio, en este capítulo se considera: en primer lugar, el punto de vista de la entidad reguladora, para establecer las condiciones generales de optimalidad aplicables al binomio distribución-red y consumidor; en segundo término, las características del consumidor, para establecer los criterios de inversión y las tarifas que se deben aplicar al usuario para conseguir las mismas condiciones de eficiencia óptima; y, por último, la distribuidora-red, para determinar la función objetivo que debería optimizar, considerando que es un monopolio, para que cumpla las mismas condiciones de eficiencia dadas por el regulador. La distribuidora-comercialización, cabe señalar, no se incluye en este análisis por estar su régimen regulatorio fuera del alcance de esta tesis. Finalmente, para observar la aplicabilidad del modelo: se analiza la forma de representar en el algoritmo la pérdida de suministro, se resumen las condiciones de optimalidad obtenidas para los entes involucrados en el proceso y, se indican aspectos prácticos de implantación en distribuidoras con diferentes escenarios de tarificación.

## Entidad reguladora

### Planteamiento

La regulación ha de conseguir que los agentes individuales se comporten de tal manera que se consiga el beneficio social global máximo en su ámbito de aplicación. Con el fin de determinar dichas condiciones aquí se presenta el conjunto de la distribución-red y del consumidor como un todo (ver Figura 3.1) y se obtienen las condiciones de optimalidad; en otras palabras, las condiciones que deben cumplirse para que se obtenga el óptimo global. Las variables de decisión correspondientes al conjunto son: Las potencias activas y reactivas de los consumidores, las variables de explotación de la red (reconfiguración, bancos de condensadores,...), las instalaciones de red y, la capacidad instalada de los consumidores. El desarrollo matemático para el modelo especificado en este capítulo, sigue la línea empleada por [Pérez-Arriaga-94].

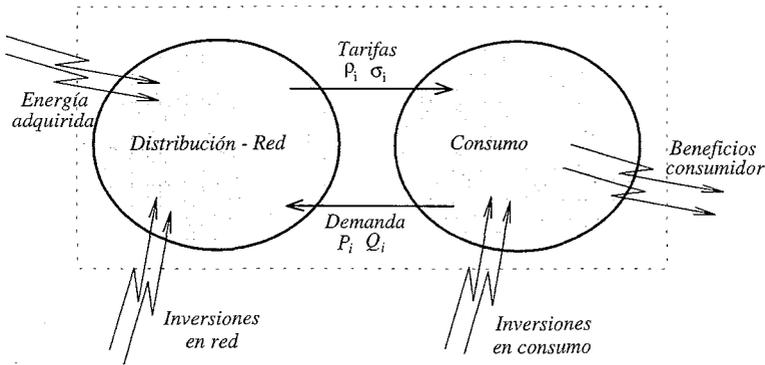


Figura 3.1. Ámbito de acción del regulador de la distribución.

El regulador debe plantearse como función objetivo a ser maximizada el beneficio social neto asociado al suministro y consumo de electricidad (*BSN*), satisfaciendo tanto las restricciones de capacidad del consumidor y las restricciones de red como las condiciones técnicas y económicas derivadas del suministro en alta tensión. El *BSN* se obtiene de la diferencia entre la utilidad obtenida por todos los consumidores por el uso de la energía eléctrica y los costes tanto variables (adquisición de la energía al por

mayor en alta tensión) como de inversión (en instalaciones de consumo y de red) y operación de la red (que pueden considerarse como fijos y asociados a la inversión).

Los beneficios obtenidos por los consumidores por el uso de la electricidad (o utilidad), se definen como:

$$BC(P, Q) = \sum_t \sum_h \sum_c BC_{mc}(P_{thc}, Q_{thc})$$

Nótese que en el documento, cuando en una expresión *no* se indican los subíndices respectivos, debe entenderse que la variable utilizada se refiere a *todas* las situaciones cubiertas por el citado subíndice. En este caso la expresión  $BC(P, Q)$  pretende englobar los beneficios obtenidos por *todos* los consumidores conectados a la red y mostrar su dependencia de *todas* las potencias activas y reactivas consumidas ( $P$  y  $Q$ ). El uso de los subíndices  $t$ ,  $h$  y  $c$ , por su parte, se hace para especificar el período de largo plazo ( $t$  pueden ser años), el de corto plazo ( $h$  pueden ser horas), y el consumidor considerado ( $c$  específico); esto es, establecer el punto considerado en el tiempo y en el espacio.

Los costes de adquisición de la energía al por mayor en alta tensión se pueden expresar como:

$$CV(P, Q, KN, N) = \sum_t \sum_h \sum_a CV_{tha}(PA_{tha}, QA_{tha})$$

La expresión  $CV_{tha}(PA_{tha}, QA_{tha})$  pretende representar los pagos realizados al suministrador en alta tensión por el consumo de potencia activa y reactiva en el alimentador  $a$  ( $PA_{tha}$  y  $QA_{tha}$ ). Estas potencias activa y reactiva no son variables independientes en el modelo, sino que dependen de las potencias activa y reactiva consumidas en los nudos de carga ( $P$  y  $Q$ ) del alimentador, de la capacidad instalada de red ( $KN$ ) y de la forma de explotación ( $N$  representa las variables de explotación de la red; esto es, la reconfiguración, los bancos de condensadores,...). Por ello, es mejor representar esos costes para toda la red como  $CV(P, Q, KN, N)$ .

El coste de inversión ( $ICC$ ) en instalaciones de consumo ( $KC$ ) se puede expresar en función de las anualidades correspondientes a cada una de las inversiones realizadas como:

$$ICC(KC) = \sum_t \sum_c ICC_{tc}(KC_{c1}, KC_{c2}, \dots, KC_{ct})$$

En la misma forma, el coste de inversión (*ICN*) en instalaciones que mejoren las condiciones de red (*KN*) se puede expresar en función de las anualidades de cada una de las inversiones realizadas como:

$$ICN(KN) = \sum_t ICN_t(KN_1, KN_2, \dots, KN_t)$$

La entidad reguladora, entonces, se debe plantear el problema:

$$Max\{BSN\} = \underset{P, Q, KN, N, KC}{Max} \{BC(P, Q) - CV(P, Q, KN, N) - ICC(KC) - ICN(KN)\}$$

Este problema de optimización está sujeto a satisfacer las restricciones de capacidad del consumidor tanto físicas de los aparatos de consumo, como acordadas o contratadas con la empresa. Éstas, expresadas por su potencia aparente para todos los consumidores, son en forma genérica:

$$S(P, Q) \leq KC$$

El multiplicador de Lagrange asociado con esta restricción ( $\xi$ ) representa el incremento unitario de coste que se ocasiona por efecto de estar activa la restricción o, dicho en otra forma, el ahorro unitario que se consigue si se relaja la condición exigida.

Además, se deben satisfacer las restricciones propias del servicio de red (capacidad de las líneas y limitaciones de tensión, expresadas en forma más detallada en el capítulo 2), las cuales se expresan aquí genéricamente como:

$$R(P, Q, KN, N) \leq R^+$$

El multiplicador de Lagrange asociado ( $\pi$ ) recoge el coste adicional unitario de no poder realizar la explotación deseada por causa de la restricción.

Este problema restringido de optimización (ver por ejemplo [Luenberger-73]) se puede transformar en uno de optimización no restringida mediante la función lagrangiana:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(P, Q, KN, N, KC, \pi, \xi) = & BC(P, Q) - CV(P, Q, KN, N) + \pi [R^+ - R(P, Q, KN, N)] + \\ & + \xi [KC - S(P, Q)] - ICC(KC) - ICN(KN) \end{aligned}$$

o separando las consideraciones de largo plazo (expansión) de las de medio y corto plazo (operación):

$$\mathcal{L} = BSN_{cp}^* - ICC - ICN$$

$BSN_{cp}^*$  es el beneficio social neto óptimo de corto plazo para valores dados de  $KC$  y  $KN$ , el cual se puede expresar como:

$$BSN_{cp}^* = \underset{P, Q, N}{Max} \{ BC - CV + \pi \cdot [R^+ - R] + \xi \cdot [KC - S] \} \quad (1)$$

### Condiciones de optimalidad

Las condiciones necesarias para obtener la máxima eficiencia del sistema se logran al derivar el lagrangiano con respecto a cada variable independiente e igualar a cero. Para la entidad reguladora ideal estas variables son  $P$ ,  $Q$ ,  $KC$ ,  $KN$ ,  $N$ ,  $\xi$  y  $\pi$ .

Las **condiciones de optimalidad de largo plazo** son las relacionadas con la inversión en expansión de las instalaciones.

- Para las instalaciones de red se tiene:

$$\frac{\partial BSN}{\partial KN_t} = 0 = \frac{\partial BSN_{cp}^*}{\partial KN_t} - \frac{\partial ICN}{\partial KN_t}$$

$$\boxed{\frac{\partial BSN_{cp}^*}{\partial KN_t} = \frac{\partial ICN}{\partial KN_t}} \quad (2)$$

o lo que es lo mismo:

$$-\frac{\partial CV}{\partial KN_t} + \frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R]}{\partial KN_t} = \frac{\partial ICN}{\partial KN_t}$$

que detallando los términos queda:

$$-\sum_h \sum_a \frac{\partial CV_{tha}}{\partial KN_t} - \sum_h \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial KN_t} = \sum_{l=t}^T \frac{\partial ICN_l}{\partial KN_t}$$

- Para las instalaciones de consumo se tiene:

$$\frac{\partial BSN}{\partial KC_{tc}} = 0 = \frac{\partial BSN_{cp}^*}{\partial KC_{tc}} - \frac{\partial ICC}{\partial KC_{tc}}$$

esto es,

$$\boxed{\frac{\partial BSN_{cp}^*}{\partial KC_{tc}} = \frac{\partial ICC}{\partial KC_{tc}}} \quad (3)$$

o lo que es lo mismo:

$$\frac{\partial \xi \cdot [KC - S]}{\partial KC_{tc}} = \frac{\partial ICC}{\partial KC_{tc}}$$

y en forma detallada:

$$\sum_h \xi_{thc} = \sum_{l=t}^T \frac{\partial ICC_l}{\partial KC_{tc}}$$

Las expresiones (2) y (3) significan que las inversiones en red y en instalaciones de consumo se deben realizar solamente hasta que sus correspondientes costes marginales igualen a los beneficios marginales en el corto plazo para el sistema y para el consumidor (respectivamente) producidos por ellas.

Las **condiciones de optimalidad de corto plazo** se obtienen así mismo derivando el lagrangiano e igualando a cero.

- Para la potencia activa es:

$$\frac{\partial BSN_{cp}}{\partial P_{thc}} = 0 = \frac{\partial BC}{\partial P_{thc}} - \frac{\partial CV}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R]}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial \xi \cdot [KC - S]}{\partial P_{thc}}$$

Y considerando que la expresión asociada con las restricciones de red (siendo  $l$  el índice identificador de la restricción) se puede expresar mejor como:

$$\pi_l \left[ R^+ - R(P, Q, KN, N) \right] = \sum_i \sum_h \sum_l \pi_{thl} \cdot \left[ R_l^+ - R_{thl}(P, Q, KN, N) \right],$$

se obtiene que:

$$\frac{\partial \pi_l \left[ R^+ - R(P, Q, KN, N) \right]}{\partial P_{thc}} = - \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial P_{thc}}$$

Además, si la expresión asociada con las restricciones de capacidad del consumidor se enuncia como:

$$\xi_c \left[ KC - S(P, Q) \right] = \sum_i \sum_h \sum_c \xi_{thc} \left[ KC_{tc} - S_{thc}(P_{thc}, Q_{thc}) \right]$$

se podrá asimismo escribir su correspondiente término como:

$$\frac{\partial \xi_c \left[ KC - S(P, Q) \right]}{\partial P_{thc}} = - \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial P_{thc}}$$

En esta forma, la expresión de optimalidad para  $P_{thc}$  se transforma en:

$$\frac{\partial BC}{\partial P_{thc}} = \frac{\partial CV}{\partial P_{thc}} + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial P_{thc}} + \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial P_{thc}}$$

Si se considera que la potencia en cabecera del alimentador ( $PA_a$ ) corresponde a la suma de las potencias gastadas por cada uno de sus consumidores incrementada en el valor de las pérdidas activas del alimentador ( $LP_a$ ), esto es:

$$PA_a = \sum_{c \in a} P_c + LP_a$$

sus costes marginales de explotación se obtienen como:

$$\frac{\partial CV}{\partial P_{thc}} = \frac{\partial CV}{\partial PA_{tha}} \cdot \left( \frac{\partial PA_{tha}}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial QA_{tha}}{\partial P_{thc}} \right) = \frac{\partial CV}{\partial PA_{tha}} \cdot \left( 1 + \frac{\partial LP_a}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial LQ_a}{\partial P_{thc}} \right)$$

Por lo cual, si se considera que el precio de compra en cabecera es:

$$\frac{\partial CV}{\partial PA_{tha}} = \theta_{tha}$$

éstos se transforman en:

$$\frac{\partial CV}{\partial P_{thc}} = \theta_{tha} \cdot \left( 1 + \frac{\partial LP_{tha}}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial LQ_a}{\partial P_{thc}} \right)$$

La expresión de los beneficios marginales queda entonces:

$$\frac{\partial BC}{\partial P_{thc}} = \frac{\partial BC_c}{\partial P_{thc}} = \theta_{tha} \cdot \left( 1 + \frac{\partial LP_{tha}}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial LQ_a}{\partial P_{thc}} \right) + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial P_{thc}} + \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial P_{thc}} \quad (4)$$

- Para la **potencia reactiva** se tiene:

$$\frac{\partial BSN_{cp}}{\partial Q_{thc}} = 0 = \frac{\partial BC}{\partial Q_{thc}} - \frac{\partial CV}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R]}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial \xi \cdot [KC - S]}{\partial Q_{thc}}$$

Si se sustituyen las derivadas:

$$\frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R(P, Q, KN, N)]}{\partial Q_{thc}} = - \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial Q_{thc}}$$

se pueden obtener los beneficios marginales como:

$$\frac{\partial BC}{\partial Q_{thc}} = \frac{\partial CV}{\partial Q_{thc}} + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial Q_{thc}} + \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial Q_{thc}}$$

Ahora, al considerar que la potencia en cabecera del alimentador ( $QA_a$ ) corresponde a la suma de las potencias gastadas por cada consumidor conectado a él y el valor de las pérdidas reactivas del alimentador ( $LQ_a$ ), esto es:

$$QA_a = \sum_{c \in a} Q_c + LQ_a$$

se tienen sus costes marginales de explotación como:

$$\frac{\partial CV}{\partial Q_{thc}} = \frac{\partial CV}{\partial QA_{tha}} \cdot \left( \frac{\partial QA_{tha}}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial PA_{tha}}{\partial Q_{thc}} \right) = \frac{\partial CV}{\partial QA_{tha}} \cdot \left( 1 + \frac{\partial LQ_a}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial LP_a}{\partial Q_{thc}} \right)$$

que al considerar el precio de cabecera de la potencia reactiva como:

$$\frac{\partial CV}{\partial QA_{tha}} = \delta_{tha}$$

se transforman en:

$$\frac{\partial CV}{\partial Q_{thc}} = \delta_{tha} \cdot \left( 1 + \frac{\partial LQ_{tha}}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial LP_{tha}}{\partial Q_{thc}} \right)$$

De acuerdo con esto, los beneficios marginales de utilizar la potencia reactiva se pueden expresar como:

$$\frac{\partial BC}{\partial Q_{thc}} = \frac{\partial BC_c}{\partial Q_{thc}} = \delta_{tha} \cdot \left( 1 + \frac{\partial LQ_{tha}}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial LP_{tha}}{\partial Q_{thc}} \right) + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial Q_{thc}} + \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial Q_{thc}} \quad (5)$$

- Para la explotación de la red se tiene:

$$\frac{\partial BSN_{cp}}{\partial N_{th}} = 0 = - \frac{\partial CV}{\partial N_{th}} + \frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R]}{\partial N_{th}}$$

Por lo cual, la explotación de la red debe cumplir la condición:

$$\boxed{\frac{\partial CV}{\partial N_{th}} = \frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R]}{\partial N_{th}}} \quad (6)$$

Esta expresión (6) significa que se deben minimizar los costes de compra de la energía en alta tensión sujeto a que mientras se satisfagan las restricciones de red. Para tratar de cumplir esta condición, el operador no necesita conocer la función de utilidad de los usuarios. Si ninguna restricción está activa, para obtener la explotación óptima basta con minimizar sin más el coste de adquisición de energía en alta tensión (en este caso los costes serán menores que para el caso restringido).

Para detallar la expresión (6) es necesario reemplazar sus componentes por:

$$\frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R(P, Q, KN, N)]}{\partial N_{th}} = - \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial N_{th}}$$

y

$$\frac{\partial CV}{\partial N_{th}} = \sum_a \frac{\partial CV_{tha}}{\partial N_{th}} = \sum_a \left( \frac{\partial CV_{tha}}{\partial P_{tha}} \cdot \frac{\partial P_{tha}}{\partial N_{th}} + \frac{\partial CV_{tha}}{\partial Q_{tha}} \cdot \frac{\partial Q_{tha}}{\partial N_{th}} \right)$$

$$o \quad \frac{\partial CV}{\partial N_{th}} = \sum_a \left( \theta_{tha} \cdot \frac{\partial P_{tha}}{\partial N_{th}} + \delta_{tha} \cdot \frac{\partial QA_{tha}}{\partial N_{th}} \right)$$

quedando:

$$\sum_a \left( \theta_{tha} \cdot \frac{\partial P_{tha}}{\partial N_{th}} + \delta_{tha} \cdot \frac{\partial QA_{tha}}{\partial N_{th}} \right) = - \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial N_{th}}$$

---

## Consumidor

---

### Demanda

Un consumidor determinado demanda la electricidad para obtener una utilidad consumiéndola. Hasta cierto punto, mientras más unidades consume por unidad de tiempo, mayor será el beneficio total que recibe. La utilidad marginal, sin embargo, normalmente disminuye por cada unidad adicional hasta llegar a saturar la capacidad de los dispositivos de consumo existentes.

El comportamiento del consumidor desde el punto de vista de su beneficio es muy predecible: cuando el precio de la energía es bajo, compra una mayor cantidad (se restringe menos en su uso) que cuando éste es alto y viceversa.

La Figura 3.2 muestra, en términos generales, la utilidad obtenida por el usuario al consumir una determinada demanda. La diferencia entre dos consumidores la pueden dar las pendientes o el número de etapas de la curva. La curva de la Figura 3.2 muestra cuatro etapas diferentes: la etapa 1 corresponde a la carga más importante para el consumidor, correspondiente al valor de utilidad marginal más alto; la etapa 2 corresponde a un bloque de carga menos crítico, que tiene una utilidad marginal inferior; la etapa 3 representa una porción de carga cuya utilidad marginal tiene una amplia variabilidad (indicando por tanto, elasticidad con el precio); y, finalmente, la carga de la etapa 4 tiene una utilidad marginal muy baja (tal como la demanda correspondiente a casos inusuales como encender un equipo de aire acondicionado en el invierno, una bombilla adicional durante el día, etc.) hasta que se alcanza la saturación de las correspondientes instalaciones del consumidor.

---

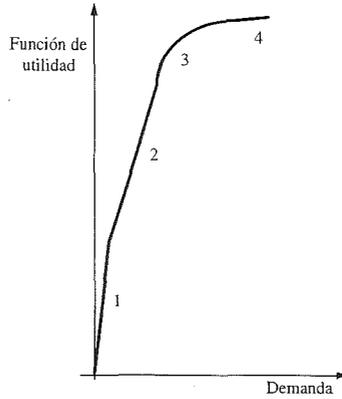


Figura 3.2. Función de utilidad del consumidor.

### Planteamiento

El consumidor está sujeto a precios dinámicos de energía y reacciona ante ellos con su demanda, de acuerdo con una determinada función de utilidad. El objeto de este análisis es el de determinar las tarifas óptimas correspondientes a las potencias activa y reactiva ( $P_{the}$  y  $Q_{the}$ ) que el regulador debe fijarle al consumidor, para que se oriente hacia la consecución de la máxima eficiencia económica para el conjunto del sistema eléctrico.

El consumidor maximiza sus beneficios netos individuales ( $BNI$ ) adaptando sus potencias activa y reactiva. Pero debe, sin embargo, requerir en general una demanda inferior a su capacidad instalada o contratada. Los  $BNI$  se obtienen de la diferencia entre los beneficios que obtiene el consumidor por el uso de la energía y los costes incurridos por él. En estos últimos se incluyen tanto los pagados por el uso de la energía, como los pagados por las inversiones realizadas en instalaciones de consumo.

$$Max\{BNI\} = \underset{P_c, Q_c, KC_c}{Max} \{BC_c(P_c, Q_c) - CVI(P_c, Q_c) - ICC_c(KC_c)\}$$

en donde  $CVI$  son los costes variables individuales para el consumidor  $c$ , y se expresan como:

$$CVI(P_c, Q_c) = \sum_t \sum_h CVI_{the}(P_{the}, Q_{the})$$

que en función de la tarifa pagada por el consumidor por la potencia activa ( $\rho_{thc}$ ) y la pagada por la potencia reactiva ( $\sigma_{thc}$ ) se consideran como:

$$CVI(P_c, Q_c) = \sum_t \sum_h (\rho_{thc} \cdot P_{thc} + \sigma_{thc} \cdot Q_{thc})$$

Los beneficios obtenidos por el consumidor  $c$  por el uso de la energía corresponden al acumulado de los obtenidos por cada hora  $h$  y año  $t$  del periodo de estudio, así:

$$BC_c(P_c, Q_c) = \sum_t \sum_h BC_{thc}(P_{thc}, Q_{thc})$$

y las inversiones realizadas por él en instalaciones de consumo, al agregarlas año a año, tienen la expresión:

$$ICC_c(KC_c) = \sum_t ICC_{tc}(KC_{1c}, \dots, KC_{lc})$$

Esta optimización se debe hacer satisfaciendo las restricciones de capacidad del consumidor en todo momento (habrá una  $KC$  por cada consumidor  $c$  y por cada año  $t$ ). Estas restricciones se pueden expresar en forma genérica como:

$$S(P, Q) \leq KC$$

En la Figura 3.3 se muestra una instalación de *consumo* que lleva asociados unos costes tanto de adquisición de energía como de inversiones y, unos beneficios obtenidos por el uso de la electricidad (la orientación es la misma del producto y contraria, por tanto, a la del flujo de caja).

El lagrangiano se puede obtener del problema restringido planteado para el consumidor  $c$  aumentando la función objetivo para considerar el efecto de su correspondiente restricción de capacidad (el multiplicador de lagrange  $\xi$  se definió anteriormente) como:

$$\mathcal{L} = BC_c(P_c, Q_c) - CVI(P_c, Q_c) + \xi \cdot [KC_c - S(P_c, Q_c)] - ICC_c(KC_c)$$

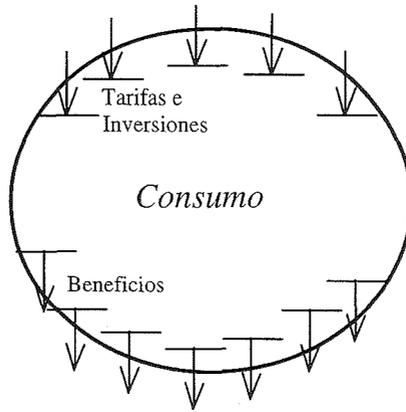


Figura 3.3. Representación simbólica de una instalación de consumo.

Y considerando que la expresión asociada con las restricciones de capacidad se puede desglosar por año  $t$  y hora  $h$ , en:

$$\xi \cdot [KC_c - S(P_c, Q_c)] = \sum_t \sum_h \xi_{thc} \cdot [KC_{tc} - S_{thc}(P_{thc}, Q_{thc})]$$

Para facilitar el análisis, se puede seguir la pauta establecida al considerar la entidad reguladora en el numeral anterior. Es decir, separar las consideraciones de largo plazo de las de corto plazo. La expresión queda:

$$\mathcal{L} = BNI_{cp}^* - ICC$$

Siendo  $BNI_{cp}^*$  el beneficio neto individual de corto plazo óptimo, el cual se puede expresar como:

$$BNI_{cp}^* = \underset{P_c, Q_c}{Max} \{ BC_c(P_c, Q_c) - CVI(P_c, Q_c) + \xi \cdot [KC_c - S] \}$$

## Condiciones de optimalidad

Para determinar las condiciones de optimalidad, las variables que el consumidor puede controlar y, por tanto, con respecto a las cuales se debe derivar e igualar a cero son en el largo plazo, la capacidad instalada  $KC_c$  y en el corto plazo, las potencias activa y reactiva.

Para buscar las condiciones de optimalidad para el **largo plazo** se toma como función objetivo el beneficio neto individual óptimo de corto plazo disminuido por las inversiones en instalaciones de consumo. De esta manera, el beneficio neto individual óptimo ( $BNI^*$ ) se puede expresar como:

$$BNI^* = \underset{KC}{Max} \{ BNI_{cp}^* - ICC \}$$

y la condición de largo plazo, la misma que determina la forma de realizar las mejores inversiones en instalaciones de consumo, será:

$$\frac{\partial BNI}{\partial KC_{tc}} = 0 = \frac{\partial BNI_{cp}^*}{\partial KC_{tc}} - \frac{\partial ICC}{\partial KC_{tc}}$$

esto es:

$$\boxed{\frac{\partial BNI_{cp}^*}{\partial KC_{tc}} = \frac{\partial ICC}{\partial KC_{tc}}} \quad (7)$$

Esta condición muestra que invertir en instalaciones de consumo es rentable hasta que el coste marginal de hacerlo iguale los beneficios marginales de corto plazo obtenidos por la correspondiente inversión. Así, a partir de dicho punto, los costes incurridos serían mayores que los beneficios que producirían. La expresión (7), al reemplazar su condición de corto plazo, se puede mostrar como:

$$\frac{\partial \xi \cdot [KC_c - S]}{\partial KC_{tc}} = \frac{\partial ICC}{\partial KC_{tc}}$$

o lo que es igual:

$$\frac{\partial ICC}{\partial KC_{ic}} = \sum_h \xi_{thc}$$

- Para la **potencia activa** se tiene:

$$\frac{\partial BNI_{cp}}{\partial P_{thc}} = 0 = \frac{\partial BC_c}{\partial P_{thc}} - \frac{\partial CVI}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial \xi \cdot [KC_c - S]}{\partial P_{thc}}$$

o, expresada en forma más descriptiva:

$$\frac{\partial BC_{thc}}{\partial P_{thc}} = \frac{\partial CVI}{\partial P_{thc}} + \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial P_{thc}}$$

y en términos de la tarifa marginalista individual ( $\rho_{thc}$ ):

$$\frac{\partial BC_{thc}}{\partial P_{thc}} = \rho_{thc}(N) + \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial P_{thc}} \quad (8)$$

Nótese que las expresiones (4) y (8) significan que la tarifa marginalista equivale a la diferencia entre el beneficio marginal ideal del consumidor y la corrección existente por estar limitada la capacidad de consumo. Esto es:

$$\rho_{thc}(N) = \frac{\partial BC_{thc}}{\partial P_{thc}} - \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial P_{thc}}$$

Los beneficios marginales obtenidos por el consumidor se obtienen de la función de utilidad marginal de la demanda mostrada en la Figura 3.4. Esta curva se obtiene tomando punto a punto el valor incremental de la función mostrada en la Figura 3.2. Nótese que de la Figura 3.4 se puede obtener la demanda específica con la cual responde el consumidor para un determinado precio unitario de energía (y por tanto, según la expresión (8), para unos determinados beneficios marginales).

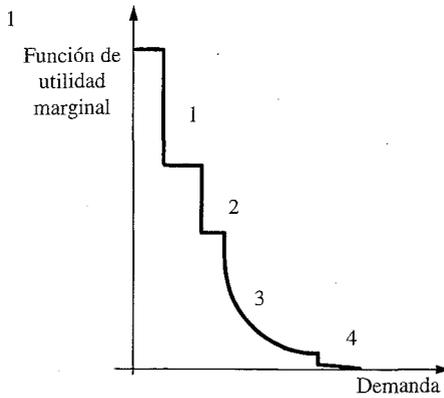


Figura 3.4. Utilidad marginal del consumidor.

La representación de una carga inelástica o una carga sometida a precios fijos es un caso particular de la anterior, con sólo unos pocos escalones que representan las tarifas fijas aplicables. En la Figura 3.5 se puede ver el modelo correspondiente a un consumidor cuya característica de utilidad marginal sólo tiene dos etapas fijas diferentes.

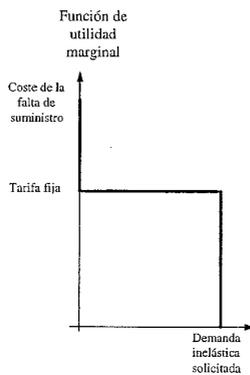


Figura 3.5. Curva demanda-precio para un consumidor con carga inelástica.

De la comparación de las ecuaciones (4) y (8) se deduce, por otra parte, que si al consumidor se le cobra la tarifa:

$$\rho_{thc} = \theta_{tha} \left( 1 + \frac{\partial LP_{tha}}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial LQ_{tha}}{\partial P_{thc}} \right) + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial P_{thc}} \quad (9)$$

mientras busca su propio beneficio consigue asimismo maximizar la función de beneficio social global.

La ecuación (9) muestra la tarifa ( $\rho_{thc}$ ) que se le debería fijar al consumidor y la dependencia que tiene de los costes en cabecera del alimentador ( $\theta_{tha}$ ), de las pérdidas activas ( $LP_{tha}$ ) y reactivas ( $LQ_{tha}$ ) y de las restricciones activas de red ( $R_{thl}$ ).

- Para la **potencia reactiva** la condición de optimalidad se puede obtener de:

$$\frac{\partial BNI_{cp}}{\partial Q_{thc}} = 0 = \frac{\partial BC_c}{\partial Q_{thc}} - \frac{\partial CVI}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial \xi \cdot [KC_c - S_c]}{\partial Q_{thc}}$$

o, expresada en forma más descriptiva:

$$\frac{\partial BC_{thc}}{\partial Q_{thc}} = \frac{\partial CVI}{\partial Q_{thc}} + \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial Q_{thc}}$$

y en términos de la tarifa marginalista individual ( $\sigma_{thc}$ ):

$$\frac{\partial BC_{thc}}{\partial Q_{thc}} = \sigma_{thc}(N) + \xi_{thc} \cdot \frac{\partial S_{thc}}{\partial Q_{thc}} \quad (10)$$

La interpretación de las ecuaciones (5) y (10) es similar a la interpretación de las correspondientes ecuaciones para la potencia activa; esto es, que si al consumidor se le cobra la tarifa:

$$\sigma_{thc} = \delta_{tha} \left( 1 + \frac{\partial LQ_{tha}}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial LP_{tha}}{\partial Q_{thc}} \right) + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial Q_{thc}} \quad (11)$$

consigue asimismo maximizar la función de beneficio social global cuando busca su propio beneficio.

---

## Distribución-Red

---

La empresa encargada de la red de distribución tiene poder de mercado debido a que las condiciones existentes de monopolio natural conducen a la existencia de una única empresa para este servicio. Por ello, es necesario establecer una regulación que la obligue a orientarse hacia la consecución del beneficio social global máximo. Esto, corresponde a invertir en instalaciones de red y a realizar su explotación de manera tal que se oriente hacia el óptimo global. Sus costes, por otra parte, se le deben cubrir completamente, incluyendo una tasa adecuada de remuneración de las inversiones realizadas.

La condición de largo plazo que la regulación debe imponerle en relación con la expansión de la red se estableció en la ecuación (2). En este apartado se quiere obtener la función objetivo ( $f_0$ ) que la distribuidora debe optimizar cuando realiza la explotación de la red (la variable  $N$  representa las variables de decisión utilizadas en la explotación de la red) para que actúe en concordancia con el beneficio social global máximo. El problema se convierte entonces en:

$$\underset{N}{\text{Max}}\{f_0\}$$

cumpliendo con las restricciones de red (cuyo multiplicador de lagrange  $\pi$  se definió anteriormente). Esto es:

$$R(P, Q, KN, N) \leq R^+$$

por lo cual, transformando el problema restringido de optimización en otro sin restricciones por medio del lagrangiano:

$$\mathcal{L} = f_0 + \pi \cdot (R^+ - R(P, Q, KN, N))$$

se puede determinar la condición de optimalidad. Derivando con respecto a la variable de decisión ( $N$ ) e igualando a cero, se tiene entonces:

---

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial N_{th}} = 0 = \frac{\partial f_o}{\partial N_{th}} + \frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R]}{\partial N_{th}}$$

o en forma más descriptiva:

$$\boxed{\frac{\partial f_o}{\partial N_{th}} = - \frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R]}{\partial N_{th}}} \quad (12)$$

Comparando las expresiones (6) y (12) se observa que el objetivo que se le debe fijar a la empresa de distribución-red para el corto plazo en su regulación es el de realizar la explotación de la red de forma que se minimice el coste de adquisición de la energía al por mayor en alta tensión. El detalle de las expresiones y las condiciones de largo plazo (las inversiones en instalaciones de red) corresponden a las obtenidas para la entidad reguladora.

En resumen, la entidad reguladora debe someter a la empresa de distribución-red a: por una parte a mejorar las instalaciones de red mientras los costes inversión incurridos no superen los correspondientes ahorros de operación obtenidos y, por otra, operar la red de forma que se minimicen los costes de adquisición de energía en alta tensión para cada situación de demanda.

---

## Representación de la pérdida de suministro

---

Cuando por efecto del incremento del consumo se violan restricciones que después de apelar a acciones alternativas (como la reconfiguración de la red para aliviar sobrecargas, la programación de los bancos de condensadores para mejorar la tensión, disminuir las pérdidas y aumentar la capacidad de transporte de los alimentadores, etc.), no se pueden resolver, se hace necesario reducir el consumo a través de la desconexión de carga. Esta acción hace que exista energía no distribuida (o END). Lo que equivale a decir, energía solicitada pero no suministrada.

El tratamiento de la energía no distribuida en el modelo desarrollado (END o QEND según se refiera a la activa o reactiva), se puede abordar de dos formas alternativas. Una forma es considerando un generador ficticio que suministra virtualmente (ver Figura

---

3.6, en donde las direcciones indican al flujo de potencia) en cada nudo la diferencia entre la sollicitación y la venta (restringida) de energía. Este coste ficticio de generación para cubrir el déficit aparece en la función objetivo como un coste más de generación al precio de pérdida de suministro.

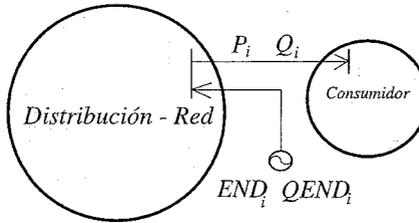


Figura 3.6. Representación de la energía no distribuida por medio de un generador virtual conectado al nudo.

El modelo de cálculo sigue el proceso iterativo descrito en el capítulo 6, en el cual al activarse una restricción se recorre la red aguas abajo ajustando las potencias activa y reactiva de acuerdo con las expresiones:

$$P_{thc} = PR_{thc} - END_{thc}$$

$$Q_{thc} = QR_{thc} - QEND_{thc}$$

donde  $PR$  y  $QR$  son las potencias de referencia demandadas por los consumidores, y  $END$  y  $QEND$  son las potencias generadas ficticiamente en el nudo de consumo al coste de la energía no distribuida (nótese que la  $END$  y la  $QEND$  dependen directamente de las condiciones de la red); esto es, son las potencias a cortar.

Nótese que en ese caso cada nudo de consumo se ha transformado en un nudo de adquisición de energía al precio de pérdida de suministro (los costes agregados de pérdida de suministro se llaman aquí  $CW$ ), de tal manera que el problema (1) se transforma en:

$$BSN_{cp}^* = \underset{P_{END}, Q_{END}, N, \xi, \pi}{Min} \left\{ CV + CW - \pi \cdot [R^+ - R] - \xi \cdot [KC - S] \right\}$$

La expresión total de los costes de pérdida de suministro es:

$$CW(END, QEND) = \sum_t \sum_h \sum_c CW_{thc}(END_{thc}, QEND_{thc})$$

La otra forma de tratar la END es, implícitamente, mediante la comunicación de señales de precios enviados por la empresa al consumidor y de señales de potencia requerida por éste a la red como se indica en la Figura 3.7. Nótese que en este caso las tomas de decisión de la red y el consumo se consideran desacopladas. Además, si se diera la posibilidad de existir END, se incrementaría la tarifa cobrada (para las potencias activa y reactiva) de acuerdo con las correspondientes variables duales asociadas (representadas por los multiplicadores de lagrange  $\pi$ ) para hacer que el consumidor desconecte carga de acuerdo con su función de utilidad (ver la Figura 3.4 para observar la reacción que tendría el consumidor ante el incremento de precio). Este método se propone en la tesis como la alternativa más adecuada en lo que concierne a la representación de la condición de fiabilidad de la distribución. Esto, por supuesto, sin restringir el análisis a un contexto regulatorio específico.

La activación de una restricción (saturación de la red, ...) hace que su variable dual asociada se incremente e incluya en su caso el efecto del coste de interrumpibilidad o de END (ver ecuaciones 9 y 11) y, por tanto, la tarifa aumente de tal forma que el consumidor al recibir esas señales de precio reaccione disminuyendo su demanda.

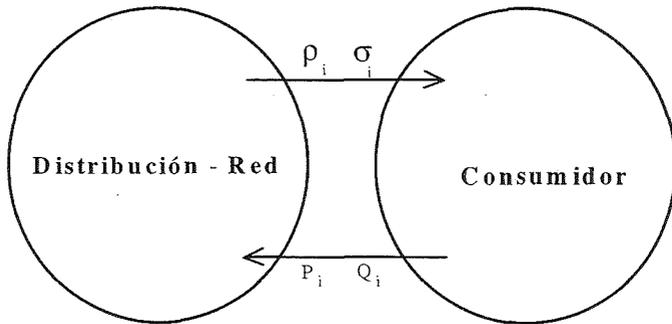


Figura 3.7. Tratamiento de la energía no distribuida por medio de señales de precio y de potencia entre la distribuidora-red y el consumidor.

El caso de la demanda que no es elástica con el precio o de la demanda que simplemente no recibe la señal de precio y no puede por tanto reaccionar ante su valor en un momento dado, está implícitamente incluido en el caso general. En caso de presentarse una restricción de red, la nueva señal de precio (incluyendo el efecto de la restricción activa de acuerdo con las ecuaciones 9 y/o 11) hace que el consumidor desconecte demanda (en concordancia con la función de beneficio marginal mostrada en la Figura 3.5) y contribuya a la desactivación de la restricción. Para los consumidores sometidos a tarifas fijas, el cálculo se hace en la misma forma descrita pero la desconexión la haría directamente la distribuidora (ver más adelante el párrafo denominado *Criterios de aplicación*).

## Esquema regulatorio

El análisis regulatorio se puede resumir para el largo y el corto plazo, como se muestra en la Tabla 3.1:

Largo Plazo		
Agente	Criterio	Interpretación
Distribución-red	$\frac{\partial BSN_{cp}^*}{\partial KN_t} = \frac{\partial ICN}{\partial KN_t}$	Mejorar la red mientras los costes incurridos de inversión no superen los ahorros obtenidos en explotación
Consumo	$\frac{\partial BNI_{cp}^*}{\partial KC_{ic}} = \frac{\partial ICC}{\partial KC_{ic}}$	Invertir mientras los costes incurridos de inversión no superen los beneficios obtenidos de explotación.
Corto Plazo		
Distribución-red	$\frac{\partial CV}{\partial N_{th}} = \frac{\partial \pi \cdot [R^+ - R]}{\partial N_{th}}$	Operar la red para minimizar los costes de adquisición de energía en alta tensión para una demanda dada.
Consumo	$\rho_{thc} = \theta_{thc} \left( 1 + \frac{\partial LP_{thc}}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial LQ_{thc}}{\partial P_{thc}} \right) + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial P_{thc}}$ $\sigma_{thc} = \delta_{thc} \left( 1 + \frac{\partial LQ_{thc}}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial LP_{thc}}{\partial Q_{thc}} \right) + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial Q_{thc}}$	Ajustar la demanda para que sus beneficios marginales igualen los precios $\rho_{thc}$ y $\sigma_{thc}$ dados por la distribuidora.

Tabla 3.1. Resumen regulatorio.

Nótese que el esquema regulatorio parte del hecho de tener desacoplados los entes involucrados en el proceso en la forma que se ilustró en la Figura 3.1. Es decir, se parte del hecho de que la empresa distribuidora sólo conoce la demanda requerida por el consumidor pero no su función de beneficio marginal. Pues, en el caso contrario, la empresa podría conectar consumidores con alta elasticidad al precio a nudos con precio elevado para reducir costes disminuyendo el consumo. Para ilustrar este último caso considérese la red de la Figura 3.8, la cual tiene dos subestaciones, 3 nudos y 4 tramos. El coste de adquisición de energía en alta tensión en la subestación 1 es de 15 pta/kWh y en la subestación 2 es de 5 pta/kWh; las impedancias de los tramos se consideran cero; los consumidores conectados a las barras 1, 2 y 3 tienen la función de beneficio marginal mostrada en la Figura 3.9; y, además, se quiere obtener la forma óptima de explotación de la red.

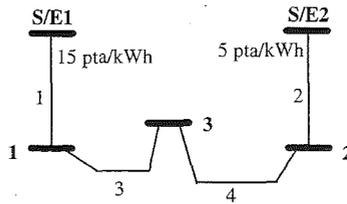


Figura 3.8. Red ejemplo.

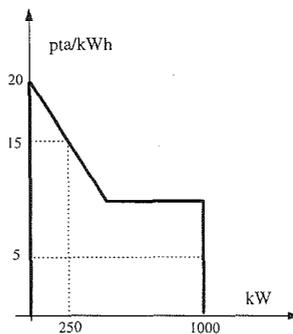


Figura 3.9. Función de beneficio marginal para los consumidores del caso ejemplo.

La minimización de los costes de adquisición en alta tensión, teniendo en cuenta la función de beneficio marginal de los consumidores, conlleva la configuración mostrada en la Figura 3.10. Con el precio de la energía a 15 pta/kWh, el consumo de cada usuario sería (ver Figura 3.9) 250 kW, con lo cual el coste total de adquisición de energía en AT sería  $3 \cdot 250 \cdot 15 = 11.250$  pta. Como se intuía anteriormente, la distribuidora conectó los consumidores con cargas muy elásticas al nudo más costoso, para reducir los costes a costa de una desconexión de carga por parte de los usuarios, lo cual es incorrecto.

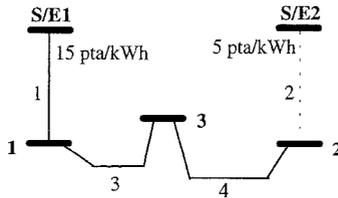


Figura 3.10. Configuración obtenida para la red ejemplo cuando la distribuidora minimiza costes de adquisición en AT teniendo en cuenta la función de beneficio marginal de los consumidores.

El razonamiento correcto parte de la exigencia a la entidad de red de minimizar los costes de compra mayorista **para una demanda dada**. La optimización se realiza a partir de la potencia requerida por el consumidor (señales de potencia de la Figura 3.1), para la cual al minimizar los costes de compra mayorista, se obtienen los nuevos precios; éstos se envían al consumidor, quien ajusta su demanda en concordancia; la distribuidora-red con los nuevos valores de potencia (señales de potencia de la Figura 3.1), obtiene la condición de explotación de mínimos costes de compra mayorista y sigue el proceso hasta que se estabilice. Nótese que en este caso la empresa de distribución-red sólo conoce la demanda del consumidor pero no tiene acceso a su función de utilidad.

Siguiendo este concepto, para cualquier valor de consumo de cada usuario, la configuración óptima es como se muestra en la Figura 3.11.

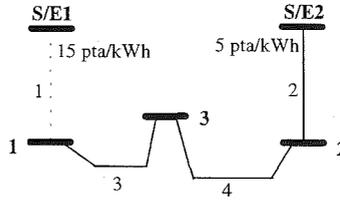


Figura 3.11. Solución óptima para el caso ejemplo.

Es obvio en este caso que, aunque el coste de compra en AT ( $3 \cdot 5 \cdot 1000 = 15.000$  pta) es mayor, el beneficio social neto es superior.

## Criterios de aplicación

La implantación práctica de las reglas propuestas en la explotación de los sistemas de distribución, conlleva un proceso basado en el conocimiento por parte de la empresa de las potencias requeridas por el consumidor (denominadas aquí señales de potencia) y por parte del consumidor, de los precios establecidos para dichas potencias (denominadas aquí señales de precio).

Las dificultades de aplicación o comunicación de los correspondientes valores, o la estructura tarifaria establecida para cada consumidor, justifican el análisis de las características de implantación necesarias para escenarios reales de explotación del sistema. Con el fin de determinar la aplicabilidad del esquema propuesto, se consideran tres escenarios: uno en el cual todos los consumidores reciben la señal de precio y pueden responder a ella, otro en el cual los consumidores no están bajo tarificación puntual o no tienen capacidad de respuesta, y finalmente otro en el cual hay consumidores sometidos a tarificación puntual y consumidores sometidos a precios fijos.

- El primer escenario corresponde a la situación en que sólo se tienen consumidores sometidos a tarificación puntual. En este caso la empresa, partiendo de la estimación de la demanda requerida por los usuarios resuelve el problema:

$$\text{Min}_N \{CV(P, Q, KN, N)\}$$

sujeto a:

$$R(P, Q, KN, N) \leq R^+$$

Teniendo la forma de explotación determinada, la empresa evalúa los precios de las potencias activa y reactiva y los comunica a los usuarios, éstos ajustan su demanda en base a su función de beneficio marginal (tipificada en la Figura 3.4), resolviendo el problema:

$$\text{Max}_{P_c, Q_c} \{BC_c(P_c, Q_c) - CVI(P_c, Q_c)\}$$

sujeto a:

$$S(P, Q) \leq KC$$

Ante esta nueva demanda, el proceso se repite sucesivamente hasta que se establezca, caso en el cual se tiene la solución para ese instante.

Este proceso se implantó en un programa de ordenador, en el cual se tomó como condición de explotación la configuración de la red (simulada en las ecuaciones por la variable N). Como se describe en el capítulo 5; por medio de una búsqueda ordenada se obtiene la configuración óptima, en la cual la función objetivo corresponde a la suma para todos los alimentadores de los costes de adquisición de energía en la cabecera. La simulación del comportamiento de cada consumidor se realiza por intermedio de una subrutina que tiene como salida la potencia ofrecida, y como entrada los precios; dentro de ella se localiza el punto de funcionamiento a partir de una versión discretizada de la función de beneficio marginal.

El cálculo se hace recorriendo en forma secuencial cada alimentador (ver capítulo 6), aguas abajo para determinar tensiones, precios (la empresa de red) y potencias (el consumidor) y aguas arriba para calcular los flujos de potencia y las pérdidas, y para controlar las restricciones de red; este proceso se realiza iterativamente hasta que se logra convergencia. En caso de ocurrir una violación de las restricciones, el precio se ajusta en concordancia con las ecuaciones 9 y 11 y se devuelve el proceso aguas abajo recalculando tensiones, precios y potencias y

aguas arriba recalculando flujos de potencia y pérdidas; esto se realiza iterativamente hasta que por acción de los consumidores (simulados en la subrutina nombrada) se desactive la restricción, caso en el cual se continúa el proceso de cálculo aguas arriba como se describió en el caso sin restricciones activas.

- El segundo escenario corresponde a la situación en que sólo existen consumidores sometidos a tarifas fijas. En este caso, la empresa determina cual es la demanda requerida por los usuarios y con base en ella resuelve el problema:

$$\underset{N}{\text{Min}}\{CV(P, Q, KN, N) + CW(END, QEND)\}$$

sujeto a:

$$R(P, Q, KN, N) \leq R^+$$

con lo cual se obtiene la solución final.

El proceso de cálculo del programa de ordenador se realiza en la misma forma descrita para el escenario anterior, con la diferencia de que las tarifas no sirven ahora como medio de control de la demanda en condiciones normales, pero sí en caso de tener restricciones violadas, ya que aparece como un medio adecuado para determinar el corte necesario de carga con el fin de eliminar la violación. La respuesta del consumidor se representa solamente por un escalón que representa la carga a tarifa fija, si el precio es superior a ella implica corte de carga o END como se mostró en la Figura 3.5.

El cálculo se hace entonces recorriendo en forma secuencial cada alimentador, aguas abajo para determinar tensiones y aguas arriba para calcular los flujos de potencia y las pérdidas, y para controlar las restricciones de red; este proceso se repite iterativamente hasta que se logre convergencia. En caso de ocurrir una violación de las restricciones, el precio se ajusta en concordancia con las ecuaciones 9 y 11 y se devuelve el proceso aguas abajo determinando tensiones y tarifas; si la tarifa es superior a la fija (cae en la zona de END en la Figura 3.5) la carga se desconecta (en este caso no la corta el usuario sino la misma empresa) y se sigue secuencialmente hasta liberar la violación en la forma del escenario anterior.

- El tercer escenario, correspondiente a la situación en que se tienen consumidores con tarificación puntual y consumidores sometidos a tarifas fijas, se procesa en la misma forma que se describió para el primer escenario, tanto para el intercambio de señales de precio y potencia como para el algoritmo de cálculo utilizado. La solución sin embargo, se interpreta diferente, pues en caso de existir restricciones de red, los consumidores que responden a los precios puntuales manejan su demanda, mientras que la desconexión de la demanda para los consumidores sometidos a tarifas fijas si se activa el escalón de END en la función de beneficio marginal, la realiza la empresa de red.
-

---

# **Capítulo 4**

## **OPTIMIZACIÓN**

---



---

## Introducción

---

El estudio de sistemas reales se ve limitado por la imposibilidad de considerar todos los aspectos que afectan su operación. Desagregar los procesos de cálculo o reducir los sistemas en estudio son simplificaciones forzadas a realizar, especialmente considerando que los problemas tratados en la tesis tienen características no lineales, discretas y de una gran dimensión que los hace muy difíciles de resolver por las exigencias computacionales tanto en la capacidad del equipo como en el tiempo de cálculo.

Los modelos de cálculo pueden ser descriptivos, cuando sólo se pretende determinar el comportamiento del sistema en una situación prefijada o prescriptivos, cuando se pretende determinar su mejor comportamiento dentro de una amplia gama de posibilidades [Prieto-94]. En los primeros, se espera que el modelo aporte, a partir de una representación matemática, el comportamiento del sistema ante unas condiciones determinadas de operación. En los modelos de optimización se busca alcanzar la mejor selección posible de los valores sobre los que se puede actuar para conseguir un objetivo prefijado.

Las técnicas a emplear para la selección óptima de los valores de estas variables se conocen como **técnicas de optimización** y son aplicables, en general, siempre que existan varias alternativas y se deba seleccionar una de entre ellas. En este sentido la optimización requiere empezar por la construcción de un modelo del sistema que relacione los valores de las diferentes variables (como en los modelos descriptivos). Estas relaciones junto con las limitaciones de las variables de control constituyen las restricciones del problema de optimización. Adicionalmente a las restricciones, resulta necesario tener otro elemento en el modelo de optimización, asociado con la necesidad de selección de alternativas y con la existencia de un criterio para llevar a cabo esa selección. La formalización matemática de este criterio se lleva a cabo mediante una función de las variables del modelo que mide lo mejor o lo peor con que un cierto conjunto de valores satisface dicho criterio. Esta función se conoce normalmente como **función objetivo** del modelo y puede cambiar de acuerdo con el interés con que se realiza la búsqueda o puede, por otra parte, ser múltiple (multiobjetivo) si existen varios criterios de interés (aplicada en temas de planificación de los sistemas de distribución

---

por [Ramírez-92]).

Las variables utilizadas en los cálculos pueden ser **continuas**, **discretas** (que toman valores predefinidos, pero aquí se consideran con este nombre aquellas que durante el proceso se pueden aproximar a variables continuas) y **altamente discretas** (aquí se consideran en esta forma aquellas variables que toman valores predefinidos pero que durante el proceso no se pueden aproximar a variables continuas, sino que sólo se pueden procesar en forma discreta).

El interés central de la tesis es resolver un problema de optimización no lineal, con variables continuas, discretas y altamente discretas y, con una función objetivo diferente para cada ente de interés y cada tipo de normativa regulatoria considerados. Lo anterior, junto con las características de las restricciones que modelan y limitan la red de distribución, hacen que el problema de la explotación óptima del sistema de distribución sea de difícil solución.

Si se tienen variables discretas en funciones lineales (tomas de los transformadores o etapas de condensadores), un método eficiente de resolución es el método conocido como *Branch & Bound* [Wagner-75]. Éste, implica una búsqueda sistemática en el espacio completo de soluciones, divide gradualmente el conjunto de todas las posibilidades en subconjuntos cada vez menores y desecha todo subconjunto infactible. La idea del método consiste en partir la región factible en subregiones, donde las variables que deben tener valores enteros vayan tomándolos progresivamente, y seguir subdividiendo mientras sea necesario. Un problema lineal mixto es aquél que contiene algunas variables restringidas a ser enteras (tomas de transformadores y etapas de condensadores); por lo cual, en un problema de minimización, la solución óptima del problema lineal será la cota inferior del problema lineal mixto (ya que por el hecho de ser menos restringido, conllevará una solución menor que la mínima). Y por otra parte, cualquier solución entera es cota superior del problema lineal (esto es, el óptimo es igual a la mejor solución obtenida o mejor que ella). Si el problema no es convexo, no se puede desechar una subregión cuya solución óptima del problema lineal sea peor que la mejor solución entera obtenida; pues si la búsqueda del óptimo requiriera que la función objetivo empeorase como paso intermedio para la consecución del objetivo, el óptimo podría estarse eliminando.

---

En la tesis se implantó el caso altamente discreto de la reconfiguración óptima junto con el modelado económico de los consumidores y las consideraciones regulatorias adoptadas. Esto se hace para determinar la validez del método estructurado, propuesto en el capítulo 2, en la resolución del problema de la explotación óptima de la distribución..

Obviamente, una forma de resolver este caso altamente discreto consistiría en revisar exhaustivamente todas las posibilidades y tomar de ellas la mejor. Para ello, se utilizaría algún procedimiento sistemático de enumeración. Por ejemplo, tomar metódicamente los dos valores posibles (si la variable entera puede tomar más de dos valores, las decisiones se pueden tomar por parejas o se puede expandir el árbol para los demás valores), evaluar la función objetivo para cada uno de ellos y, subdividir secuencialmente el problema hasta considerar todas las alternativas como se muestra en la Figura 4.1. En ella se representa un árbol de búsqueda posible que se seguiría cuando se tienen tres variables de decisión 0-1.

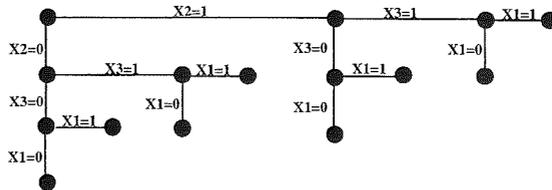


Figura 4.1. Árbol de búsqueda correspondiente a la enumeración exhaustiva.

Este proceso se puede realizar sistemática y exhaustivamente en una red muy pequeña, pero para una red normal, como se vio en el capítulo 2, es completamente inviable realizarlo.

Un compromiso posible es el reducir el espacio de búsqueda, aún a costa de poder perder el óptimo. Existen en la literatura diferentes métodos para abordar este problema. Aquí, sin embargo, los métodos propuestos se clasifican en: electrotécnicos, si utilizan características de la red para organizar la búsqueda; y naturales, si la búsqueda la determinan condiciones asimilables a formas de comportamiento existentes en la naturaleza. Los primeros, pueden hacer uso de tres alternativas diferentes: la

constructiva, la destructiva y la de permutación; mientras que los segundos emplean tres métodos: el “*simulated annealing*” (en español el término correcto parece ser *revenido simulado*, pero su utilización está muy restringida al área metalúrgica y, por tanto, no es relacionable en áreas más genéricas como es el caso de la optimización), los algoritmos genéticos y las redes neuronales. Algunos métodos considerados, como por ejemplo los que usan heurísticos o sistemas expertos, utilizan reglas lógicas incluidas en los ya nombrados (por ello no se consideran en un apartado especial). Otros, que pueden ser prometedores, como la aplicación de la lógica difusa en la optimización de redes de distribución, se han planteado en la literatura estudiada para solucionar otros problemas de distribución, como la planificación de la red [Miranda-94] o la reposición del suministro [Partanen-94].

A continuación se describen los métodos electrotécnicos, los métodos naturales y un análisis crítico de las cualidades y fallos observados en ellos, mediante algunos ejemplos ilustrativos cuyas soluciones se contrastan con las obtenidas por el método descrito en el capítulo 5.

---

## Métodos electrotécnicos

---

### Construcción

En este método el problema de reconfigurar óptimamente la red sigue la estrategia de construir la red radial óptima conectando elemento por elemento [Glamocanin-90]. Para ello, se parte de tener sólo los nudos alimentadores en AT (subestaciones AT/MT), se estiman las pérdidas activas totales al conectar cada uno de los elementos asociados con dichos nudos y se acopla aquél que conlleve las menores pérdidas. A partir de esta subred conectada se sigue conectando sucesivamente el elemento que conlleve las menores pérdidas totales hasta que todos los nudos de la red estén en la red conectada. En este caso se tiene la red radial buscada y se para el proceso. Este método permite considerar las restricciones de capacidad y regulación de tensión establecidas, muy fácilmente. El proceso se comprobó con la red tomada de la misma referencia, cuyo óptimo se muestra en la Figura 4.2.

---

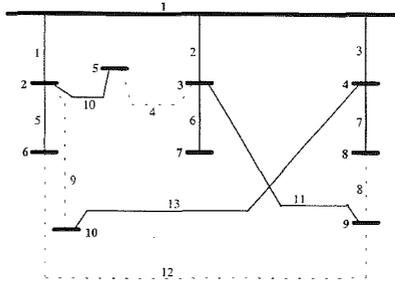


Figura 4.2. Solución óptima para la red de [Glamocanin-90].

Las líneas a trazos mostradas en la Figura 4.2 corresponden a los elementos que quedan sin conectar al parar el proceso de búsqueda. Esto es, son los enlaces que quedan en la red. La secuencia óptima de conexión de elementos para esta red fue: 1, 2, 11, 4, 3, 5, 6, 13 y 7. De esta forma, se energizan los nudos 2, 3, 9, 5, 4, 6, 7, 10, y 8. El método conlleva, en general, a la obtención de óptimos locales, pues realiza la búsqueda en forma ciega (como lo demostró Baldick en la discusión del mismo artículo) utilizando la red cuya solución por el método estipulado se muestra en la Figura 4.3 (pérdidas: 6,25 kW, enlace: 2). Sin embargo, la configuración óptima (obtenida por el método descrito en el capítulo 5) corresponde a la mostrada en la Figura 4.4 (pérdidas: 5,25 kW, enlace: 3).

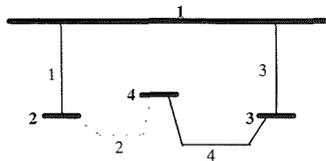


Figura 4.3. Solución obtenida para la red de [Baldick-90-2] al usar el método de construcción.

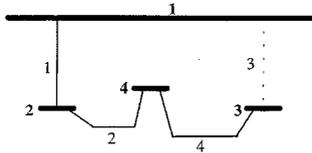


Figura 4.4. Solución óptima para la red de [Baldick-90-2].

## Destrucción

Este método comienza con la red mallada (todos los elementos conectados) y obtiene la red radial óptima mediante la apertura (destrucción) lazo por lazo. [Shirmohammadi-89] la aplica haciendo los cálculos necesarios para la red mallada mediante un flujo de cargas radial, en el cual se compensa el efecto del enlace (que en este caso no está abierto) mediante las inyecciones adecuadas de corriente en sus extremos. [Augugliaro-91], en cambio, sólo plantea las ecuaciones y utiliza un programa comercial genérico de optimización para resolver el problema, mientras que [Roldán-93], utilizando el flujo radial con compensación, disminuye el campo de búsqueda mediante la reducción de la red en dos aspectos: uno, es reducir los tramos que sólo pertenecen a un lazo a uno solo, con el peligro de estar eliminando una solución que esté en el centro del lazo; y la otra, es reducir los tramos en antena a una carga en el punto de conexión, lo cual es válido cuando se consideran tensiones y potencias fijas, pero que habría que tratarla con cuidado cuando se tienen cargas en los nudos que dependen de la tensión o del precio.

En cada paso, el elemento que se abre es aquél que, perteneciendo a un lazo, conlleva los mínimos flujos de potencia. En la red considerada, la secuencia de apertura seguida por el algoritmo correspondió a las ramas 9, 4, 12, y 8 con lo cual la red quedó radial.

Con este método se considera que se obtiene la mejor secuencia de apertura para la red mallada. La secuencia para una red radial sería diferente a la obtenida para una red mallada, por ello, [Goswami-91] propone ajustar el método de construcción a redes radiales, cerrando cada lazo para determinar dónde se debería abrir. Esta secuencia, señala el autor, se sigue hasta conseguir la solución (nótese que viene siendo una mezcla entre el método de destrucción y el de permutación que se describe debajo). El método así ajustado tiene el problema de hacer cálculos con redes radiales que no corresponden

a la red solución. Para el ejemplo, considerado en [Baran-89], este algoritmo obtiene la solución mostrada en la Figura 4.5 (pérdidas: 141,54 kW, enlaces: 10, 14, 32, 7 y 37) cuando el óptimo es el mostrado en la Figura 4.6 (pérdidas: 132,09 kW, enlaces: 7, 14, 9, 32 y 37).

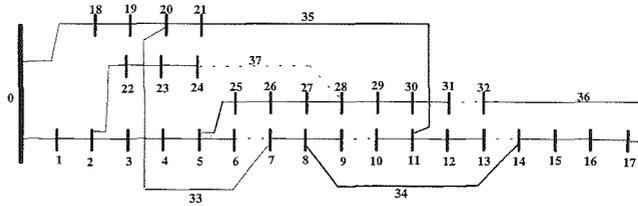


Figura 4.5. Solución obtenida para la red de [Baran-89] al usar el método de destrucción.

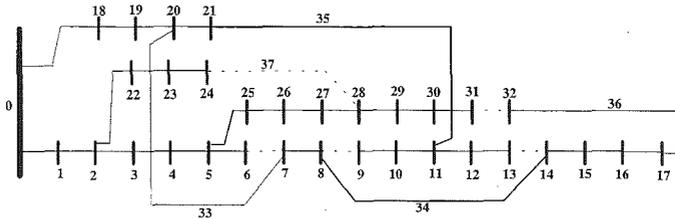


Figura 4.6. Solución óptima para la red de [Baran-89].

## Permutación

En este método se parte de una red topológicamente factible (sin mallas y sin islas), se estima la disminución de las pérdidas de los cambios unitarios factibles (cambiar un enlace por una rama del mismo lazo) y se efectúa el cambio que reduzca más las pérdidas [Civanlar-88, Castro-90, Taylor-90]. Manteniendo ese enlace como fijo, se evalúan los nuevos cambios unitarios, seleccionando el mejor, y así sucesivamente hasta que la función objetivo (pérdidas) no mejore, caso en el cual se considera obtenida la solución.

La red de la Figura 4.2 se obtiene por este método partiendo de tener los enlaces 10,11,12 y 13 e intercambiarlos así: el enlace 13 por la rama 9, el 11 por la 8, y el 10 por la 4. En este método la solución depende de la configuración de partida y puede, por tanto, caer fácilmente en óptimos locales. La solución obtenida por este método para la red tomada de [Augugliaro-91] se muestra en la Figura 4.7. Allí, se partió de tener los elementos 14, 42, 43, 44, 45, 46 y 47 como enlaces y se obtuvo la solución mostrada (pérdidas: 118,02 kW, enlaces: 10, 11, 14, 32, 43, 45 y 47); el óptimo es, sin embargo, el mostrado en la Figura 4.8 (pérdidas: 116,17 kW, enlaces: 10, 12, 14, 32, 43, 45 y 47).

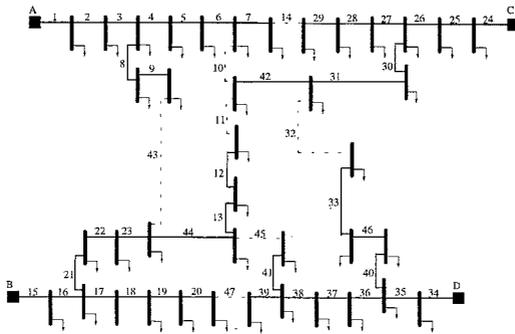


Figura 4.7. Solución para la red de [Augugliaro-91] por el método de permutación.

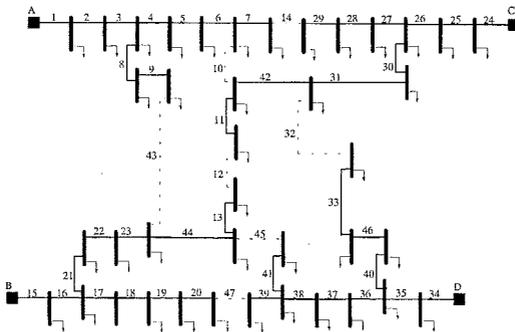


Figura 4.8. Solución óptima para la red de [Augugliaro-91].

---

## Métodos naturales

---

### *Simulated annealing*

Este método asimila conceptos del proceso de revenido de materiales. El material durante el proceso considerado se somete a calentamiento con el fin de liberar tensiones. De esta forma, sus moléculas se mueven en libertad y después se enfrían lentamente hasta que se asientan en una configuración de mínima energía. Si el proceso no es suficientemente lento, las moléculas tenderán a asentarse en una configuración de energía superior. El proceso se realiza siguiendo un plan de enfriado que consiste en especificar una serie de temperaturas y permitir que el sólido alcance el equilibrio térmico en cada una de ellas.

Si las diferentes configuraciones se reunieran en el conjunto  $S$  (con elementos  $s$ ) y las temperaturas en  $T$ , la probabilidad de que el sólido alcance el equilibrio térmico en la opción  $s$  a la temperatura  $T$  es:

$$p_T(s) = \frac{1}{Z(T)} \cdot \exp\left\{-\frac{U(s)}{KT}\right\}$$

donde  $U(s)$  es la energía de la opción  $s$ ,  $Z(T)$  es una constante de normalización y  $K$  es la constante de Boltzman. De esta expresión es claro que a medida que la temperatura se acerca a cero, la distribución  $p_T(s)$  se concentra más y más en aquellas opciones  $s$  con energía  $U$  mínima.

El método se basa entonces en una búsqueda local del óptimo con saltos aleatorios (para evitar óptimos locales) en el espacio de las variables, en el cual la probabilidad de estos saltos va disminuyendo en función del tiempo. El método converge asintóticamente al óptimo global en un número infinito de iteraciones. Por lo cual, la obtención de una solución requiere la limitación del tiempo y de la dimensión, haciendo que la solución obtenida, formalmente, sólo corresponda a un óptimo local.

En el problema de reconfiguración óptima,  $\{s\}$  comprende las configuraciones factibles (sin islas y sin mallas) de la red de distribución y  $T$  el parámetro de control.

---

A pesar de su sencillez conceptual, la aplicación del método al problema de la reconfiguración óptima [Hasselfield-90, Chiang-90, Nara-91, Cherkaoui-92 y Chang-94] requiere la selección adecuada de un espacio de configuraciones (conjunto de configuraciones posibles), un conjunto de movimientos (factibles), una función de coste y un itinerario de enfriamiento. El **espacio de configuraciones** está dado por las configuraciones factibles. Para la búsqueda de la reconfiguración óptima se necesita que entre cualquier par de configuraciones del espacio se pueda acceder en un número finito de pasos.

Para el cambio de configuración, el **conjunto de movimientos** está dado por las acciones a tomar. Lo normal es tomar dos tipos de movimientos:

- **Movimiento unitario:**

Se cierra al azar un enlace del conjunto de enlaces (se crea un lazo).

Se abre al azar una rama del conjunto de ramas (se abre el lazo).

- **Movimiento múltiple:**

Se cierran al azar algunos enlaces del conjunto de enlaces (se crean lazos).

Se abre al azar el número correspondiente de ramas perteneciente a los conjuntos de ramas correspondientes a cada uno de los lazos formados (se abren los lazos).

Estos dos tipos de mecanismos de perturbación son similares en su carácter, pero diferentes en su número. La utilización de los dos tipos de perturbación no es uniforme; en las altas temperaturas (inicialmente) se usan más las perturbaciones múltiples, mientras que en las bajas (cerca de la solución) se usan más las perturbaciones unitarias.

Desde el punto de vista global, si se usa un mecanismo de perturbación para cambiar la configuración  $i$  a la  $j$ , con costes  $C(i)$  y  $C(j)$ , el criterio de aceptación se basa en la probabilidad de aceptación  $p(accept)$ , la cual es igual a 1 si el coste  $C(j) \leq C(i)$  (la configuración se aceptaría) y es igual a  $\exp\{(C(i)-C(j))/T\}$  en caso contrario (la configuración tendría una probabilidad  $p$  de ser aceptada y  $1-p$  de ser rechazada). La transición entre una configuración y otra está basada en dos acciones: una, es la aplicación del mecanismo de perturbación y la otra, es la aplicación del criterio de aceptación.

---

El itinerario de enfriamiento corresponde a una aproximación al proceso asintótico de solución en un número finito de pasos, con el fin de hacerlo computacionalmente realizable. Con este fin, se define un conjunto de parámetros que guían la convergencia del algoritmo. Estos parámetros se conocen como itinerario de enfriamiento y lo determinan: la temperatura inicial ( $T^0$ ), un esquema de reducción de temperatura, la temperatura final o criterio de parada y un número finito de movimientos en cada temperatura. La selección de un itinerario adecuado es un punto crítico en el algoritmo y se puede plantear como:

- La temperatura se reduce por medio de  $T_{k+j} = \alpha(T_k) \cdot T_k$ , en donde  $\alpha(T_k)$  es una variable entre 0,85 y 0,98 dependiente tanto del criterio de aceptación, como de la varianza y media muestrales de los valores de coste a la temperatura actual.
- La permanencia en cada temperatura se puede dar, ya sea por el número máximo de perturbaciones fijado o por una tasa de aceptación predeterminada.
- La convergencia se alcanza cuando en 5 temperaturas diferentes los valores de la media muestral del coste no cambian apreciablemente o cuando la tasa de aceptación (número de aceptaciones/número de movimientos propuestos) es muy pequeña (menor del 1%).

Este método es bastante robusto y permite evadir los óptimos locales. Sin embargo requiere tiempos de cálculo elevados y bastantes recursos computacionales.

## Redes neuronales

Una red neuronal está formada por un conjunto de unidades elementales de proceso llamadas neuronas que se conectan de acuerdo con un determinado patrón de conectividad [CIGRE-93]. En la Figura 4.9 se muestra la neurona tal vez más típica, conocida como Mc Cullock Pitts (algunos la llaman también “perceptrón”).

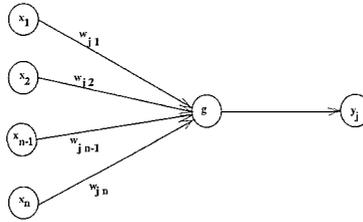


Figura 4.9. Neurona de Mc Cullock Pitts.

Esta neurona está caracterizada por una serie de entradas ( $X_1, \dots, X_n$ ) y por unos pesos ( $W_{j1}, \dots, W_{jn}$ ), afectando cada entrada de la neurona su función de activación  $g$  y su salida  $y_j$ . La suma de las entradas afectadas por sus correspondientes pesos da la entrada neta de la neurona. Ésta usa la entrada neta con información de su función de activación para determinar su nuevo estado de activación.

La red neuronal puede estar formada por una o varias capas y tener un mecanismo de aprendizaje o entrenamiento (ver Figura 4.10 tomada de [Muñoz-94], en donde cada círculo representa una neurona como la de la Figura 4.9). El aprendizaje se realiza por medio de un subconjunto de los vectores de entrada llamado conjunto de entrenamiento, cuyas propiedades se conocen o son representativas. El aprendizaje altera los pesos asociados con las interconexiones y lleva a una modificación en la fortaleza de las interconexiones.

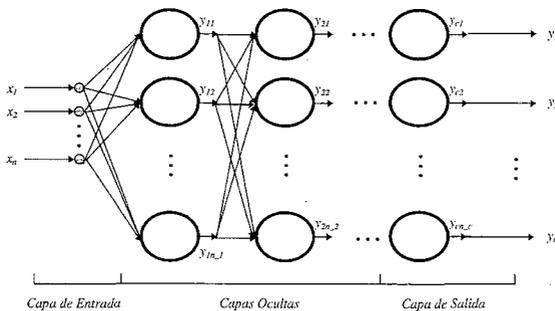


Figura 4.10 Estructura de una red neuronal multicapa.

Para aplicar las redes neuronales al problema combinatorial de la reconfiguración es necesario someter la red neuronal a un aprendizaje supervisado, en el cual se parte de un conjunto de entrenamiento formado por entradas y salidas. Las entradas corresponden a diversos patrones de carga y las salidas a las configuraciones óptimas [Kim-93]. La red neuronal aprende la relación entre la entrada y la salida y la generaliza; de manera que cuando se le presenta un ejemplo es capaz de dar una solución buena. Con el fin de representar adecuadamente los patrones de carga, [Kim-93] usa una red multicapa que permite modelar la compleja y no lineal relación entre la entrada y la salida con la capa oculta.

El conjunto de entrenamiento puede obtenerse por cualquiera de los métodos presentados en este capítulo o por el método propuesto en el capítulo 5. En el momento en que se requiere la solución para unas condiciones determinadas, ésta se obtiene muy rápidamente pues no requiere la realización de cálculo alguno, sino que la red neuronal la infiere con base en el entrenamiento realizado.

Nótese que la aplicación de las redes neuronales parece apropiada para condiciones de tiempo real. Sin embargo, para la etapa de aprendizaje requiere la ayuda de uno de los otros métodos.

## Algoritmos genéticos

La técnica conocida como “Algoritmos Genéticos” corresponde a un algoritmo de búsqueda basado en la mecánica de la selección natural asociada con la genética [Holland-75]. El método combina la naturaleza adaptativa de la genética con la optimización de funciones. Simulando la supervivencia de una función de ajuste definida mediante un vector de caracteres, la solución se busca intercambiando información aleatoriamente. El vector de caracteres se denomina (en asociación con la genética) cromosoma y sus elementos se denominan genes. En cada generación se establece un nuevo conjunto de cromosomas usando genes y piezas de los mejores cromosomas anteriores. El método explota eficientemente la información histórica para buscar puntos con comportamiento esperado mejor.

---

Debido al uso de información discreta codificada por parte de los algoritmos genéticos, éstos se pueden aplicar satisfactoriamente a problemas de optimización discreta mal condicionados.

Por el objetivo que se pretende, el funcionamiento de los algoritmos genéticos se guía emulando el comportamiento de la naturaleza. Se quiere que aquello que sea favorable para la supervivencia de la población sea asumida por ésta, mientras que aquello que represente debilidad sea descartado.

El algoritmo genera una población aleatoria de individuos que se evalúa siguiendo un criterio que indique lo cerca que están estos individuos de la solución deseada. La segunda medida es crear un procedimiento que seleccione las características más ventajosas de la población (selección) para generar la siguiente población (reproducción). Esta generación estará en promedio más cerca de la solución. La repetición sucesiva de este proceso permite alcanzar una buena solución. Para prevenir la dependencia de la falta de diversidad de la población inicial, se posibilita un cambio aleatorio de la información hereditaria (mutación).

Las principales ventajas de los algoritmos genéticos están en su robustez y en que el control del proceso lo da la misma función de evaluación.

Conceptualmente el algoritmo es sencillo [Marín-92], ya que consta fundamentalmente de tres operadores: reproducción, cruce y mutación. El operador **reproducción** comienza generando una población aleatoria de  $n$  individuos, cada individuo representado por una cadena de caracteres (cromosomas) cuyos componentes están formados por elementos de algún alfabeto ( $\Phi$ ).

Cromosoma:  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m$  con  $\alpha_i \in \Phi$

Cada  $\alpha_i$  corresponde a un **gene** cuyo valor se denomina **alelo**, y cuya localización en la cadena se denomina **lugar**. Cada uno de los  $n$  individuos tiene una función objetivo o evaluación que indica el grado de cercanía que tiene a la solución del problema. Esta función objetivo marca la habilidad de supervivencia de ese individuo en la siguiente generación. Por ejemplo, cuando se está maximizando, si se divide la función objetivo del individuo por la suma de las funciones objetivos de la población se tiene la

---

probabilidad de selección del individuo para la reproducción (para minimizar se pueden tomar los inversos de la función objetivo). Esta probabilidad aparece asociada con la cantidad de copias (reproducción) que tendrá del individuo la nueva población. A medida que se tienen las copias, se introducen en la “caja de apareamiento” para más adelante.

El operador **cruce** corresponde al apareamiento aleatorio realizado por parejas de individuos con una probabilidad llamada probabilidad de cruce. El apareamiento consiste en intercambiar trozos de cromosoma logrando un par de nuevos individuos. El tamaño de dichos trozos los da una posición de corte determinada aleatoriamente.

Padres	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$	$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7$
Cruce		
Hijos	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7$	$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$

El operador **mutación** consiste en la variación aleatoria de los genes con una probabilidad llamada de mutación y, tiene el objetivo de tratar de evadir los óptimos locales (al reducir la dependencia de la población inicial).

La consecuencia de utilización de estos operadores es la de tener una generación mejor (más adaptada), ya que va manteniendo los alelos que contribuyen más a la supervivencia.

La referencia [Nara-92] propone el uso de los algoritmos genéticos en la reconfiguración óptima y compara sus resultados con los obtenidos al aplicar la técnica *simulated annealing*, encontrando los primeros más eficientes. Al aplicar el algoritmo, sin embargo, los autores no explotan las características topológicas del problema, ya que no relacionan los enlaces con los lazos básicos, a pesar de identificarlos como variables de decisión para determinar la configuración (allí los llaman *open sectionalizing branches*). El problema de factibilidad, por su parte, lo maneja débilmente, ya que lo considera a posteriori; esto es, primero se genera la configuración y luego si ésta no es factible la desecha.

Para aplicar los algoritmos genéticos a la reconfiguración, es importante como primera medida definir un cromosoma adecuado. Parece directo seleccionar como cromosoma el vector que da el estado de los elementos de la red (abierto/cerrado), pero produce un porcentaje inmensamente alto de configuraciones infactibles, cuya evaluación requiere mucho esfuerzo y hacen que la limitación normal de tiempo impida conseguir el óptimo.

Una opción adecuada (ver apéndice) es conformar el cromosoma con tantas partes como lazos aparezcan en la red y cada parte con los genes que sean necesarios para representar el número de elementos del lazo con un código como el **Gray** [Horowitz-89]. Por ejemplo, una red con 4 lazos, en la cual el primer lazo tiene 13 elementos, el segundo 12, el tercero 6, y el cuarto 13, requeriría para los lazos: 4 bits o genes para el primero, 4 para el segundo, 3 para el tercero, y 4 para el cuarto. Además, tendría un cromosoma:

$$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8, \alpha_9, \alpha_{10}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{14}, \alpha_{15},$$

en donde los primeros 4 genes (1-4) dan la posición del enlace en el lazo 1 de acuerdo con una enumeración predeterminada, los genes 5-8 darían información del enlace en el lazo 2; los genes 9-11 la darían del enlace del lazo 3 y, los genes 12-15 darían la posición del enlace del lazo 4. Nótese de todas maneras que si la red tiene 30 elementos no se necesitan de esta forma 30 genes, sino sólo 15 para representarla en el cromosoma. La traducción de la información binaria se entiende que ha de hacerse en código Gray, pues el decimal codificado en binario puede hacer oscilar el algoritmo si la solución es cercana a un cambio brusco de código como sería de las posiciones 15 (01111) a la 16 (10000). En este caso la proporción de configuraciones infactibles se reduce significativamente.

---

## **Análisis crítico**

---

Los métodos descritos obtienen en general una buena configuración de la red de distribución, pero en la práctica sin garantía de que sea la óptima en ningún caso. Sin embargo, los llamados electrotécnicos realizan una búsqueda muy limitada, mientras que los naturales requieren altos esfuerzos computacionales.

---

Los métodos electrotécnicos no garantizan la consecución del óptimo global, puesto que realizan una búsqueda muy restringida (*sólo el mejor*). Es decir, a partir de una búsqueda local sólo toman la mejor opción surgida según el criterio tomado (normalmente pérdidas) como se ilustra en la Figura 4.1 (allí el punto representa una evaluación, las líneas oblicuas representan una búsqueda local alrededor de ese punto y la línea vertical corresponde a la decisión de tomar la mejor opción: abrir un elemento en el método de destrucción, conectar un elemento en el método de construcción o intercambiar la mejor pareja enlace-rama en el método de permutación). El método de destrucción da una secuencia de apertura de lazos para llevar la red mallada a radial. La secuencia se basa en la red mallada pero no necesariamente es adecuada para la red radial. En el método de permutación, sin embargo, la solución puede depender de la configuración inicial y corresponder a un óptimo local.

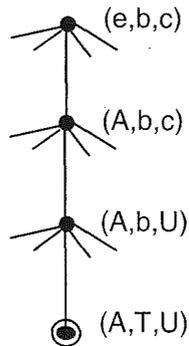


Figura 4.1. Búsqueda “*sólo el mejor*”.

Los métodos naturales por su parte, pueden conceptualmente garantizar el óptimo pero precisan de mucho tiempo de cálculo y exigen requerimientos computacionales elevados. Las redes neuronales necesitan utilizar algún método de los descritos para realizar su etapa de entrenamiento, por lo cual no mejora los demás métodos, sino que simplemente los utiliza en tiempos diferentes a los de la búsqueda de la configuración óptima. Los algoritmos genéticos y el *simulated annealing*, en cambio, por ser aleatorios dificultan el almacenamiento de valores dependientes de la configuración que podrían utilizarse para reducir los cálculos de la sección de red no afectada por el cambio

realizado. Sin embargo, el *simulated annealing* podría utilizarse en conjunto con algún método de búsqueda local relacionado con el problema considerado.

Con base en estas consideraciones, en el siguiente capítulo se propone un método de reconfiguración óptima para resolver los problemas presentados.

---

# **Capítulo 5**

## **RECONFIGURACIÓN**

---



---

## Introducción

---

La reconfiguración de alimentadores es una práctica común en redes de distribución y consiste en el uso de dispositivos de conmutación que modifican la topología de la red de tal manera que quién realiza su operación pueda satisfacer unos determinados objetivos de explotación del sistema eléctrico.

Numerosas referencias han abordado el problema de reconfiguración de alimentadores de distribución, en condiciones de emergencia para eliminar sobrecargas o desequilibrios, y en condiciones normales para minimizar pérdidas. En el capítulo 4 se presentaron los métodos aplicados, mostrando a su vez los inconvenientes observados en su comportamiento. Sin embargo, la solución existente parece todavía insuficiente, ya sea por la calidad de la solución obtenida o por los recursos computacionales utilizados. El algoritmo propuesto en esta tesis procura solucionar esas deficiencias y se ha utilizado para optimizar la operación de la red de distribución en condiciones normales de trabajo. Su aplicación en situaciones de emergencia, además, parece ser fácilmente realizable, ya sea para maximizar la continuidad del suministro, para equilibrar cargas o para equilibrar alimentadores; sin embargo estos objetivos no se han tratado en la tesis por considerarlos fuera de su alcance.

El método desarrollado sigue el principio de permutación descrito en el capítulo 4, pero realiza una búsqueda más amplia y mejor organizada que la realizada por otros métodos; logra a su vez, adicionalmente, una mayor eficiencia computacional al explotar las características técnicas específicas del problema. Se ha observado también, como se verá más adelante, que mientras el método propuesto siempre ha encontrado en la práctica la solución óptima, los otros pueden fallar con relativa facilidad. Este punto es muy importante en el contexto de la tesis, donde se consideran funciones objetivo diferentes de la típicamente plana función de pérdidas.

En el próximo párrafo se plantea el problema, determinando el estado que define la configuración, con base en los principios topológicos básicos, y justificando la razón de las múltiples funciones objetivo. Se describe luego el método propuesto, presentando facetas importantes de la implantación, y aplicándolo a algunos ejemplos

---

representativos. Finalmente se muestra el intento realizado de implantar el algoritmo propuesto con la filosofía de procesamiento paralelo.

## Planteamiento

### Definición de estado

Las redes de distribución tienen una configuración "mallada" (ver Figura 5.1) pero se explotan radialmente, esto es, cuando están en funcionamiento sólo tienen una vía de alimentación.

Cuando se realiza la explotación de la red sólo están cerrados los elementos necesarios para alimentar *todos los nudos* pero sin permitir más vías de alimentación (exigencia de "radialidad"). Esta condición corresponde estrictamente a la definición de **árbol** (apéndice 1). En la Figura 5.2 se puede ver una configuración radial para una red de distribución que concuerda con un árbol de la gráfica de la red mostrada en la Figura 5.1; sus elementos por ello se referenciarán en adelante con el nombre dado a los elementos del árbol, i.e., **ramas**.

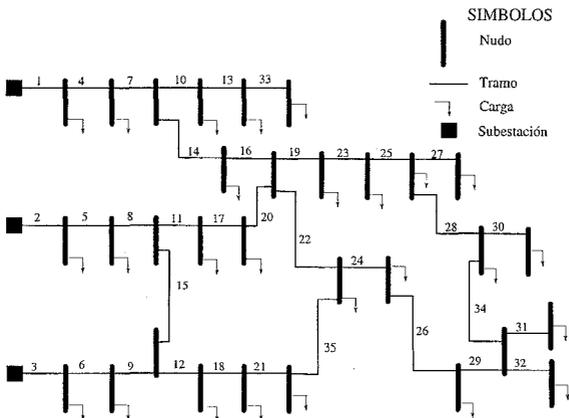


Figura 5.1. Gráfica de una red de distribución

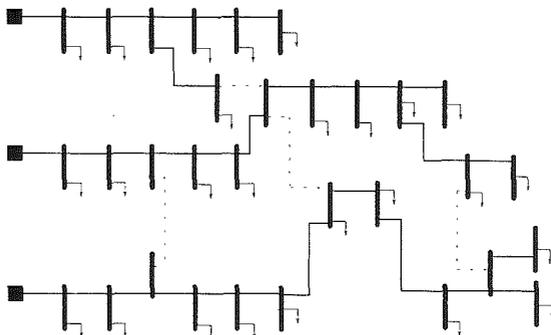


Figura 5.2. Árbol de la red de distribución de la Figura 5.1.

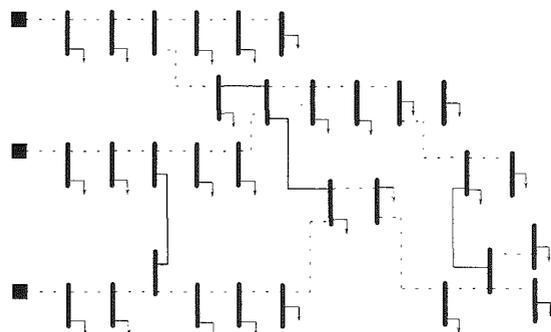


Figura 5.3 Coárbol de la red de distribución de la Figura 5.1, asociado con el árbol de la Figura 5.2.

Al cerrar uno de los elementos abiertos, se estaría eliminando la condición de radialidad, creando un lazo en la red (lazo básico). Esto es lo que sucede con los elementos del **coárbol**, por ello, en adelante a estos elementos se les conocerá también con el nombre de **enlaces** (en la Figura 5.3 se muestran los enlaces asociados con el árbol de la Figura 5.2, con líneas continuas). Los lazos básicos son aquéllos que sólo tienen un enlace (los demás elementos del lazo básico son ramas), esto es, un lazo básico siempre está asociado con un solo enlace. Por comodidad en la presentación, no obstante, en adelante se nombrarán simplemente lazos, a los lazos básicos de la configuración inicial.

Los elementos de la red se pueden encontrar en dos estados diferentes, abierto como sucede con los **enlaces** y cerrados como sucede con las **ramas**. Los **enlaces** (15, 16, 22 y

34 en la Figura 5.1, dibujados con líneas continuas en la Figura 5.3) dan la posibilidad de re-configurar la red y las **ramas** son de dos tipos:

- Las **ramas de lazo** o sea aquellas que están incluidas en los **lazos** y que permiten por tanto, junto con los **enlaces** realizar la re-configuración (En la Figura 5.2, se dibujaron con líneas continuas las ramas para un árbol de la red de la Figura 5.1, de las cuales las ramas de lazo son: 1 a 9, 11 a 12, 14, 17 a 21, 23 a 26, 28, 29, y 35).
- Las **ramas en antena** y que no entran por tanto, en el algoritmo de re-configuración (10, 13, 27, y 30 a 33 en la Figura 5.1). [Roldán-93] agrega las cargas de estas ramas en una sola carga conectada al nudo de conexión al lazo, no obstante cuando las potencias en los nudos cambian con la tensión, o con los precios, esta aproximación pierde validez.

Si un enlace cambia su estado (se cierra), es necesario que para mantener la radialidad, una rama *del mismo lazo* también cambie su estado (se abra). En otras palabras, si un enlace se transforma en rama (se tendría otro árbol diferente), una rama del mismo lazo se debe transformar en enlace. Este proceso se conoce como re-configuración.

Es necesario, entonces, que en un lazo no existan dos elementos en estado abierto pues habría zonas sin alimentar o islas, y que no se cierre algún enlace (sin cambiar nada más) pues la red se estaría explotando en forma mallada y no se estaría satisfaciendo, por tanto, la condición de radialidad.

Cuando la red está funcionando en forma radial, la estructura topológica es la de un árbol, y cambiar de configuración corresponde a cambiar de árbol, por lo tanto, el número de configuraciones posibles corresponde al número de árboles diferentes. Si se fuera a hacer una evaluación exhaustiva y no se considerara ningún tipo de restricciones, el número máximo de configuraciones diferentes que se podría generar, mediante la contabilización de tener  $r$  elementos conectados de  $e$  posibles, se puede obtener por medio de la expresión:

$$\frac{e!}{r!.1!} \quad (1)$$

(siendo  $r$  el número de ramas,  $e$  el número de elementos, y  $l$  el número de enlaces). Esto quiere decir que para una red de distribución de un tamaño relativamente normal (350 elementos, 300 ramas, y 50 enlaces se generarían de esta forma del orden de  $1,3 \cdot 10^{62}$  configuraciones), independientemente del equipo de cálculo empleado, el proceso es irrealizable. La mayor parte de las configuraciones generadas de esta manera son infactibles debido a que incluyen mallas o islas. La generación de configuraciones se puede acotar más conociendo las ramas de lazo; la expresión anterior se puede ajustar entonces, reemplazando  $e$  por el número de elementos de lazo  $e_l$  (ramas de lazo y enlaces) y las ramas  $r$  por las ramas de lazo  $r_l$  (si el caso anterior tuviera 250 elementos de lazo, 200 ramas de lazo, y 50 enlaces se podrían generar del orden de  $1,3 \cdot 10^{53}$  configuraciones de las cuales muchas son todavía infactibles).

La identificación de los lazos puede mejorar la generación de configuraciones factibles en la red. En este caso todas las combinaciones posibles estarán dadas por el producto de los números de elementos de lazo de los lazos, como se ve en la expresión:

$$\prod_{i=1}^l e_i \quad (2)$$

(siendo  $e_i$  el número de elementos del lazo  $i$ , y  $l$  el número de lazos), nótese sin embargo que por la falta de especificidad de los lazos, todavía se pueden generar configuraciones infactibles cuando se colocan varios enlaces sobre ramas comunes a varios lazos (como por ejemplo en la Figura 5.1 abrir los elementos 2, 8, 16 y 34). Esto quiere decir que para la pequeña red de distribución de la Figura 5.1 (con 11, 14, 7, y 21 elementos por lazo) sería necesario hacer del orden de 22 mil evaluaciones (la ecuación daría unas 52 mil configuraciones para los 35 elementos, 31 ramas y 4 lazos, mientras que la misma fórmula pero considerando 28 elementos de lazo, 24 ramas de lazo y 4 enlaces daría unas 20 mil configuraciones a evaluar). El número de configuraciones al considerar los elementos por lazo se ha acotado bastante; es necesario además, descontar las infactibilidades que se presentan en configuraciones que impliquen corte de la alimentación, es decir, aquéllas que incluyan la apertura de varios elementos en sectores comunes a varios lazos (como por ejemplo en la Figura 5.1 abrir los elementos 1, 2, 3 y 11). Resulta finalmente:

$$\prod_{i=1}^l e_i - \sum_{i=1}^l \left( \sum_{j=i+1}^l e_{ij}^2 * \prod_{\substack{k=1 \\ \text{siendo} \\ k \neq j \wedge k \neq i}}^l e_{sk} \right) - \prod_{i=1}^n e_{i1}^{r-i} \quad (3)$$

(siendo  $e_{ij}$  el número de elementos entre los lazos  $j$  e  $i$ ,  $l$  el número de lazos, y  $e_s$  el número de elementos que sólo pertenecen al lazo  $k$ ).

La definición del estado que da la configuración de la red, debe hacerse cuidadosamente de manera que facilite la generación de configuraciones factibles. Debido a que la condición de radialidad da la inexistencia de lazos, y a que los lazos se deshacen al abrir los enlaces, es necesario definir un vector de estados que tenga tantas posiciones como lazos, y en cada una se tenga el número del enlace correspondiente. Para la red mostrada el estado sería:

$$\text{Estado} = [15 \quad 16 \quad 22 \quad 34]$$

Esta definición de estado no elimina completamente la presencia de infactibilidades, pero facilita su control. Para eliminarlas completamente se necesita además, la ayuda de vectores que guíen el movimiento del enlace para que al reconfigurar recorra siempre espacio factible (ver capítulo 7).

En la tesis, la generación de configuraciones factibles se basa, en resumen, en dos puntos importantes: la definición del vector de estado con base en los enlaces y el uso de punteros a datos para que cuando se reconfigura, el enlace se mueva por espacio factible.

## Función objetivo

En la búsqueda de la configuración radial óptima, las pérdidas óhmicas han sido utilizadas típicamente como la función objetivo a ser minimizada. Este enfoque ha sido adecuado para sistemas regulados tradicionalmente, con empresas verticalmente integradas y con despacho óptimo centralizado para la generación y la transmisión, donde los sistemas de distribución se consideran simplemente como unas cargas agregadas.

En la tesis sin embargo, se ofrece una perspectiva más amplia para la función de distribución. La empresa de distribución se considera como una entidad optimizadora por sí misma, con sus propios objetivos comerciales y una variedad de medios de control para satisfacerlos. Entre los medios de control, la reconfiguración de redes de distribución es el medio más drástico y el primero en decidirse; otros incluyen compensación de reactiva, cambio de tomas de los transformadores, control directo de carga e interrupción, y precios puntuales enviados directamente a los consumidores.

Este capítulo sólo tiene en cuenta la reconfiguración de redes de distribución, pero dentro de este contexto más amplio. Aún con un marco regulatorio tradicional, la empresa de distribución puede reconocer la existencia de precios geográficamente diferenciados del suministro realizado desde la red de transmisión [Schweppe-88], dando por tanto, un nueva dimensión de la interacción distribución-transmisión al simple objetivo anterior de minimización de pérdidas. Pero más interesadamente, dentro de las nuevas opciones de regulación de las empresas eléctricas basadas en mercados, cabría el que las empresas distribuidoras puedan comprar potencia al por mayor a los precios nodales de las correspondientes subestaciones de transporte o reparto y venderla al consumidor a tarifas reguladas o libremente fijadas. El espacio para actividades comerciales es amplio, incluyendo diferentes formas de gestión de demanda y de relaciones novedosas con los consumidores, vía control de carga directo o señales económicas.

El método aquí presentado para la reconfiguración puede acomodar fácilmente los costes de adquisición de energía, los costes globales del consumo, las pérdidas de potencia, o la función objetivo que mejor se ajuste a los intereses de la empresa distribuidora específica.

Los referencias que consideran el tema de la reconfiguración óptima, toman como función objetivo las pérdidas activas. En esta tesis también se ha utilizado la misma función objetivo para probar el algoritmo en forma comparativa con los casos presentados por los diversos autores, pero las pruebas se ampliaron para incluir la potencia adquirida en forma mayorista, como una buena medida de calibrar el algoritmo para la utilización de diversas funciones objetivo, puesto que cuando las potencias en todos los nudos de carga son fijas, la solución es la misma que para la minimización

de las pérdidas de potencia. Para observar ésto, considérese la potencia activa total como  $PT$ , las potencias en los nudos como  $P$  (consideradas fijas) y las pérdidas activas para los tramos como  $Per$  (dependen de las potencias que fluyen por el tramo y de la configuración), de tal manera que:

$$PT = \sum_{i=1}^n P_i + Per_i$$

Por lo cual el problema a resolver es:

$$\text{Min}\{PT\} = \text{Min}\left\{\sum_{i=1}^n P_i + Per_i\right\} = \sum_{i=1}^n P_i + \text{Min}\left\{\sum_{i=1}^n Per_i\right\}$$

o lo que es lo mismo:

$$\text{Min}\{PT\} = \text{Min}\left\{\sum_{i=1}^n Per_i\right\}$$

De esta manera al considerar las potencias fijas el problema de realizar la reconfiguración óptima tomando como función objetivo las potencias adquiridas en AT y las pérdidas activas es el mismo (en la implantación es necesario ser cuidadosos con la precisión de cálculo utilizada pues la escala es diferente). Si las restricciones se activan o si las potencias de la carga son elásticas con los precios o con la tensión, los problemas de optimización para las dos funciones objetivo son diferentes.

La minimización de costes de suministro en alta tensión, para tener la misma solución que la obtenida en la minimización de pérdidas, requiere adicionalmente que los precios de suministro de la energía en AT sean iguales.

Para probar la teoría general desarrollada, en la tesis se consideraron también otras funciones objetivo tales como: los ingresos netos de la empresa de distribución-red si se le cobrara y pagara a precios puntuales (lo cual es perverso como se expresó en el capítulo 3), o los beneficios totales de los consumidores.

---

## Método propuesto

---

### Generalidades

El problema de optimización considerado es de naturaleza discreta y gran dimensión. Una generación ciega de soluciones conllevará un alto porcentaje de infactibilidades. La evaluación cuantitativa de una configuración propuesta (chequeo de factibilidad, flujo de carga y cálculo de la función objetivo, descrita en el capítulo 6) se puede reducir significativamente si ésta proviene de una modificación unitaria (sólo se tiene un intercambio de un enlace por una rama) de una configuración evaluada previamente.

Estas facetas del problema han sugerido el uso de un planteamiento basado en la enumeración truncada del conjunto completo de soluciones. Sólo se generan y evalúan configuraciones topológicamente factibles (ver capítulo 7), y ellas siempre resultan de cambios unitarios de configuraciones previamente evaluadas.

La búsqueda comienza con una configuración radial suministrada por el usuario y se procede en dos formas: local, esto es, evaluando configuraciones que sólo tienen un cambio unitario con respecto a la configuración base, y global, tomando decisiones que permitan organizar la búsqueda con el fin de mejorar la función objetivo a partir de la percepción que se obtenga de la búsqueda local.

La *búsqueda local* se hace:

- moviendo un enlace hacia la fuente, primero por un alimentador (asociado con el lazo) hasta que la función objetivo empeore y luego por el otro alimentador, y seleccionando el mejor cambio observado;
- siguiendo este proceso lazo por lazo hasta realizarlo con todos los lazos disponibles; y
- clasificando los mejores cambios del mejor al peor.

La *búsqueda global* se hace organizando las decisiones en dos formas:

- En profundidad, seleccionando el mejor cambio obtenido en la búsqueda local, congelando ese cambio (manteniendo el cambio realizado para todo el subárbol
-

que le sigue) y continuando este proceso hasta que no se encuentren más configuraciones mejores.

Estas decisiones pretenden recorrer primero el espacio donde se ven las mayores mejoras, de tal manera que al parar la búsqueda se haya recorrido el espacio más probable de consecución del óptimo.

- En anchura, descongelando la decisión tomada en profundidad, tomando la decisión contraria y congelándola para seguir buscando en profundidad.

Estas decisiones pretenden evitar caer en óptimos locales recorriendo espacio de búsqueda que no parece muy prometedor pero que podría mejorar posteriormente.

## Búsqueda global

En forma genérica el método corresponde al utilizado por [Morelato-89 y Latorre-92] en otros contextos, y es diferente de los planteados por [Civanlar-88, Castro-90, Taylor-90,...] puesto que ellos sólo avanzan en profundidad, utilizan diferentes elementos de decisión y además, no evalúan la función objetivo con un flujo de cargas radial.

La búsqueda se puede representar en forma de árbol, tal como se muestra en la Figura 5.4. Éste se organiza para prevenir repeticiones y facilitar la definición de truncamientos significativos del espacio de soluciones.

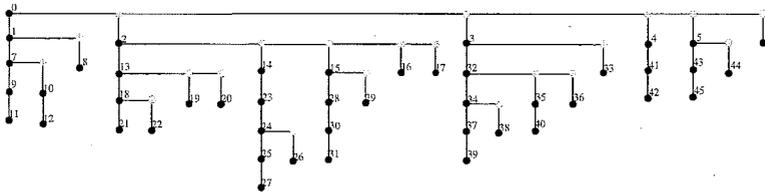


Figura 5.4. Árbol de búsqueda del óptimo.

La idea detrás de la búsqueda arborescente es que una solución inicial razonable se puede mejorar sistemáticamente por medio de modificaciones unitarias, guiadas por evaluaciones exploratorias locales de la función objetivo y por algunas reglas heurísticas para el truncamiento del espacio de búsqueda. Estas reglas se han obtenido gracias a la observación del comportamiento de versiones preliminares del algoritmo, cuando se

probaron con una cantidad y variedad de casos tomados de redes reales o bien con casos tomados de las referencias.

El algoritmo usa la lógica de escoger la configuración que parece mejor, cuando toma la siguiente modificación del punto de operación. Sin embargo, para evitar quedarse atrapado en óptimos locales, el algoritmo sigue dos estrategias diferentes:

- Avanzar en profundidad a pesar de que la función objetivo empeore.
- Avanzar en anchura aunque no sea la mejor opción que se haya identificado localmente.

En el árbol de búsqueda los nodos representan puntos de operación, (el punto inicial o raíz lo suministra el usuario) y las ramas representan decisiones unitarias que conectan un nodo con su vecino. Cada nodo del árbol contiene una solución completa donde hay puntos que se mantienen todavía disponibles (abiertos), y puntos en que las variables de decisión están congeladas (cerrados). Un nodo abierto se puede expandir más pues no tiene todas las variables de decisión congeladas mientras que en un nodo cerrado todas las variables de decisión están congeladas, y por tanto no es posible continuar la búsqueda. Como los nodos corresponden a soluciones completas, y los mejores nodos se expanden primero, el proceso se puede interrumpir en cualquier momento y suministrar en general una solución buena que bien podría ser la óptima.

Existen dos tipos de ramas. Las verticales representan un cambio en el estado de la variable de decisión, que queda congelada de ahí en adelante. El nuevo nodo es diferente de su nodo padre y se necesita evaluar. A cada rama vertical siempre corresponde una horizontal (cada nodo padre tiene dos nodos hijos) que representa la decisión opuesta, i.e., congelar el actual estado de la variable de decisión. A pesar de ser lógicamente diferente este nuevo nodo, el punto de operación físico no ha cambiado y por tanto el nuevo nodo no se tiene que evaluar.

El árbol de búsqueda es exhaustivo, puesto que su construcción garantiza la exploración de todas las combinaciones de las variables de decisión; la repetición de los nodos se evita puesto que los dos nodos creados de cualquier nodo padre tienen la misma variable de decisión pero con valores diferentes, de tal manera que sus

descendientes no pueden ser iguales. A pesar de no repetirse los nodos, las configuraciones sí se pueden repetir cuando existen varios elementos comunes en varios lazos. En este caso dos nodos diferentes pueden corresponder a una misma configuración cuando se consideran los mismos enlaces para diferente lazo (por ejemplo un nodo puede tenerse cuando para el lazo 1 se tiene el enlace 5, para el lazo 2 se tiene el enlace 13 y para el lazo 3 se tiene el enlace 1; y otro diferente pero que equivale a la misma configuración, se tiene cuando para el lazo 1 se tiene el enlace 1, para el lazo 2 se tiene el enlace 5 y para el lazo 3 se tiene el enlace 13). Este problema menor se ha eliminado mediante una cuidadosa selección de punteros en la implantación computacional del algoritmo (ver capítulo 7).

La Figura 5.4 muestra el árbol obtenido cuando un caso de ancho 5 y sin empeoramientos se desarrolla para la red de la Figura 5.5. Los nodos que requieren evaluación se han numerado a medida que se crean (los otros nodos no se han numerado). Nótese la lógica “*primero el mejor*” (no la lógica “*sólo el mejor*”) en la cual la búsqueda crece verticalmente, más que horizontalmente; la secuencia de evaluación de los nodos del ejemplo es 0, 1 (el mejor hijo), 7 (el mejor hijo de 1), 9, 11 (no aparecen mejoras por tanto se devuelve la búsqueda al nodo abierto más cercano), 10 (el segundo mejor obtenido en la búsqueda local del nodo 7), 12 (no aparecen mejoras por tanto se devuelve la búsqueda nuevamente), 8 (no aparecen mejoras por tanto se devuelve nuevamente la búsqueda), 2, 13, 18, 21 (nuevamente se devuelve la búsqueda por no aparecer mejoras), 22 (no aparecen mejoras por lo cual se devuelve en el árbol para buscar el siguiente nodo abierto), 19 (no aparecen mejoras por tanto se devuelve la búsqueda nuevamente), 20 (se devuelve la búsqueda nuevamente por no aparecer mejoras), 14, 23, 24, 25, 27 (no aparecen mejoras por lo cual se busca un nuevo nodo abierto), 26 (por no aparecer mejoras se devuelve la búsqueda nuevamente), 15, 28, 30, 31 (no aparecen mejoras por lo cual se devuelve la búsqueda nuevamente), 29 (no aparecen mejoras por ello se busca un nuevo nodo abierto), 16 (no aparecen mejoras por tanto se devuelve la búsqueda nuevamente), 17 (no aparecen mejoras por tanto se devuelve la búsqueda nuevamente), 3, 32, 34, 37, 39 (no existen mejoras por lo cual se busca otro nodo abierto), 38 (no aparecen mejoras por tanto se devuelve la búsqueda nuevamente), 35, 40 (no aparecen mejoras por tanto se devuelve la búsqueda nuevamente), 36 (se devuelve la búsqueda nuevamente por no aparecer mejoras), 33 (no

aparecen mejoras por tanto se devuelve la búsqueda por otro nodo abierto), 4, 41, 42 (por no aparecer mejoras se busca un nuevo nodo abierto), 5, 43, 45 (no aparecen mejoras por tanto se devuelve la búsqueda nuevamente), 44 (como no mejora se devuelve la búsqueda nuevamente), y 6 (se devuelve la búsqueda nuevamente por no aparecer mejoras y como no encuentra nodos abiertos termina). El óptimo corresponde a la configuración de la red que tiene los elementos 14, 10, 43, 11, 45, 32, y 47 como enlaces (que resulta ser un nodo del árbol un ancho 0 y una profundidad 4).

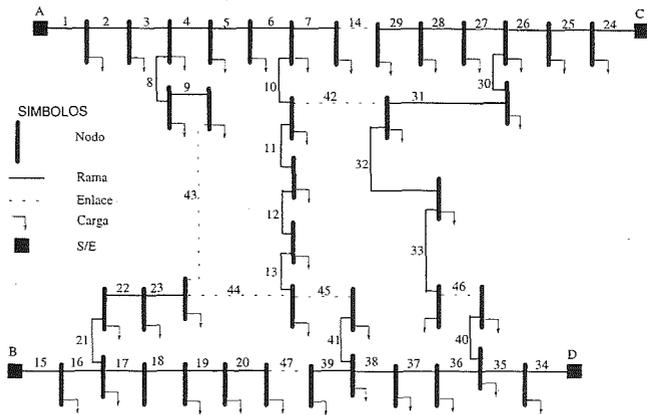


Figura 5.5. Red ilustrativa de distribución.

## Características de la implantación

### Definición de la lógica *primero el mejor*

Una decisión importante en el diseño del árbol de búsqueda se tiene que tomar, cuando se pretende hacer uso de la información obtenida ante un cambio unitario positivo, para seguir con el proceso de búsqueda.

Una posibilidad a seguir, después de tomar el mejor cambio, es congelar la decisión “mantenga el nuevo enlace (Y) de ahora en adelante”, como se hace en las referencias [Civanlar-88, Castro-90, Taylor-90] que usan el método de permutación. Cuando la

búsqueda en el sentido vertical (tomar *primero el mejor*) se haya agotado, el movimiento en el árbol de búsqueda se debe hacer, recogiendo la decisión contraria que se había dejado abierta para exploración posterior (las citadas referencias no realizan este tipo de búsqueda), i.e., “mantenga el elemento **Y** como rama de ahora en adelante”.

En la Figura 5.6 se muestra la decisión tomada en cada nodo, y en la Figura 5.7 se muestra parte del árbol obtenido para optimizar la red de la Figura 5.5. En este método es muy fácil tener en cuenta restricciones que limiten el número máximo de conmutaciones, ya que basta con parar la búsqueda en profundidad cuando se cumpla la correspondiente restricción. Sin embargo, como la decisión de congelar el enlace implica congelar todos los elementos del lazo, i.e., es muy drástica, la localización del óptimo se puede presentar con facilidad muy desplazada a lo ancho, como sucede en el ejemplo mostrado, por lo cual algoritmos tipo “sólo el mejor” (como los de [Civanlar-88] o [Castro-90]) en ese caso sólo lograrían una solución buena dada por el estado 14,10,43,11,45,32,47 (ya que su selección es sólo la de la configuración que se ve mejor en cada búsqueda local) pero **no** la óptima que corresponde al estado 14,10,43,12,45,32,47 (situado en el nivel de profundidad 3, y ancho 3 del árbol de búsqueda mostrado en la Figura 5.7).

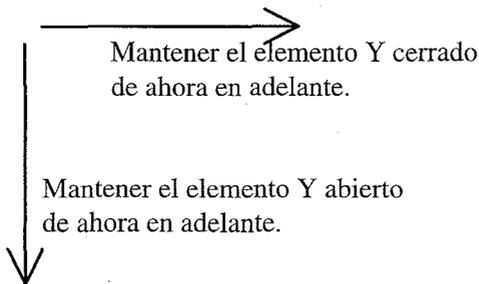


Figura 5.6. Decisión por nodo con la lógica congelar-el-enlace-primero.

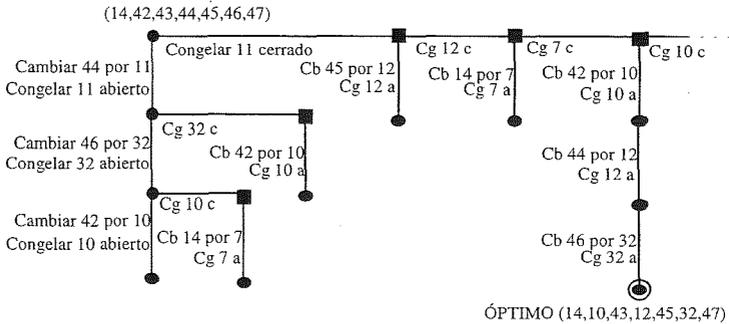


Figura 5.7. Árbol de búsqueda con la lógica congelar-el-enlace-primero.

La contundencia de la decisión de congelar el enlace, e implícitamente con ello de congelar también todos los elementos del lazo, hace que se restrinja bastante el desarrollo del árbol en la dirección vertical y que si en esta dirección no se halla el óptimo (como podría ser normal), sea necesario desplazarse bastante a lo ancho para conseguirlo. Cuando se trabaja con redes grandes es imprescindible podar el árbol, esto es, utilizar criterios de truncamiento; por lo cual si el óptimo está desplazado muy a la derecha (como sucede en este ejemplo), éste sea improbable de alcanzar. Este problema motivó el rechazo de esta alternativa de búsqueda y la investigación de otra alternativa mejor.

El esquema adoptado consiste en realizar el mismo tipo de decisión, pero congelando la decisión “mantenga la nueva rama cerrada de ahora en adelante” (congelar la rama  $X$  primero, y moverse en profundidad en la búsqueda dejando abierta para exploración posterior la decisión opuesta, (esto es, dejando para exploración posterior la decisión “mantenga el elemento  $X$  como enlace de ahora en adelante”). En la Figura 5.8 se muestra la decisión tomada en cada nodo, y en la Figura 5.9 se muestra parte del árbol obtenido para optimizar la misma red anterior (esta parte de árbol corresponde a la parte izquierda del mostrado en la Figura 5.4, con los cambios especificados con base en el vector de estado).

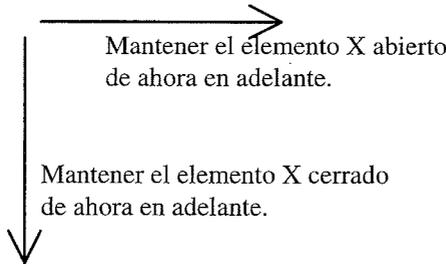


Figura 5.8. Decisión por nodo con la lógica congelar-la-rama-primero.

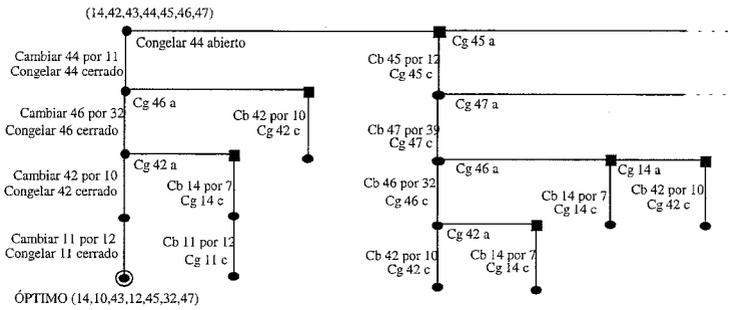


Figura 5.9. Árbol de búsqueda con la lógica congelar-el-tramo-primero.

En este método para tener en cuenta la restricción de tener un número máximo de conmutaciones, sería necesario introducirla de forma muy estricta desechando la configuración como infactible cuando aparezca, o cargarle un coste a la función objetivo para permitirle superar el límite sólo como paso intermedio para lograr el óptimo. Este último método lo emplea [Chang-94], al afectar la función objetivo (pérdidas) por el factor  $(1+\alpha)$  cuando el número de conmutaciones supera el valor estipulado como máximo (en el artículo se utiliza un  $\alpha$  de 0,2 para afectar la función objetivo total, aunque sólo se debería afectar la parte de función objetivo directamente relacionada con la conmutación analizada, o mejor aún, estimar el coste real de la conmutación e incluirlo como parte de la función objetivo).

Si para tomar en cuenta esta restricción se parara la búsqueda al llegar al límite de conmutaciones, se podría estar eliminando el óptimo en casos como el de la Figura 5.9,

en donde fué necesario hacer un segundo cambio en el cuarto lazo para obtener el óptimo (la primera decisión consistió en cerrar el elemento 44 y abrir el elemento 11, y luego en cerrar el elemento 11 y abrir el elemento 12, esto es, se necesitó corregir la decisión tomada inicialmente). Por esta razón y por el tipo de decisión tomada para desarrollar el árbol de búsqueda, en la tesis se prefiere la opción de congelar en profundidad la rama que se cierra.

En la estrategia seguida, la decisión tomada es menos drástica (sólo un elemento se congela y no todos los elementos del lazo), por lo cual se puede revisar la decisión tomada en el lazo y conseguir más fácilmente el óptimo. La estrategia seguida, como se puede observar se extiende mucho más verticalmente y menos horizontalmente, lo cual tiene implicaciones importantes en la utilización de los criterios de truncamiento.

### Búsqueda local

Una faceta importante de la implantación se tiene en la búsqueda local, la cual se encarga de la generación de configuraciones topológicamente factibles con base en cambios unitarios, de la evaluación de esas configuraciones, de la selección de la mejor obtenida por lazo analizado, y de la clasificación de los mejores cambios unitarios almacenados.

Para generar una configuración factible se mueve el enlace (se intercambia por un tramo) a la posición adyacente en un alimentador (de los asociados con él). Para ello se sigue la dirección dada por un puntero que identifica el tramo adyacente (*inonc*), y se revisan las condiciones de factibilidad:

- que no se haya llegado a la fuente,
- que la rama no esté abierta ya,
- que el número total de ramas de los 2 alimentadores asociados con el lazo considerado sea el mismo antes y después de la conmutación.

Generada la configuración factible se evalúa la nueva función objetivo; esto se hace identificando los 2 alimentadores asociados con el lazo y corrigiendo la función objetivo (cambiando el valor almacenado de los alimentadores recalculados), si ésta mejora, se continúa el movimiento del enlace a la siguiente posición, hasta que lo impida alguna de

las 3 condiciones de factibilidad planteadas, mientras que si no mejora se devuelve el enlace a la posición de partida y se comienza el mismo proceso a lo largo del otro alimentador.

Teniendo la función objetivo, se compara con la anterior y si la nueva es mejor, se continúa el movimiento del enlace, la evaluación de la nueva función objetivo y la comparación de la anterior, hasta que no se observe ninguna mejora o hasta que se incumpla una de las tres condiciones de factibilidad.

Si ya no se puede mover más el enlace en ese sentido se devuelve la red a la configuración de partida y se comienza el movimiento del enlace por el otro alimentador asociado, siguiendo el mismo proceso anterior.

Después de evaluar las reconfiguraciones en un lazo (movimiento del enlace por los 2 alimentadores asociados), se continúa uno a uno con los demás lazos disponibles, hasta cubrirlos todos.

La búsqueda local termina después de clasificar los mejores cambios logrados por lazo del mejor al peor.

La búsqueda global tomará el mejor cambio logrado, como se describió en el párrafo anterior, y dejará los demás cambios como nodos abiertos para su posterior desarrollo.

## **Crterios de truncamiento**

El espacio de búsqueda está determinado por los lazos existentes en la red y por el número de elementos de la red de distribución considerada. Por ello una forma directa de limitar el espacio de búsqueda aparece de la congelación a priori de los lazos a analizar o de los elementos de la red considerados. Esta congelación de partida se refiere a mantener la rama cerrada o a mantener el enlace abierto durante todo el proceso de búsqueda. Congelar una rama implica que ésta no entre como variable de decisión durante todo el proceso, mientras que congelar un lazo corresponde no sólo a eliminar en adelante el enlace que lo define, como variable de decisión, sino que además todas las ramas de ese lazo quedan fijas en todo el proceso de búsqueda del óptimo.

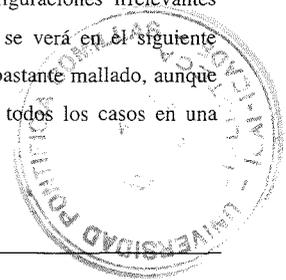
---

El árbol de búsqueda tiene dos tipos de desplazamientos, en profundidad y en anchura. Cada desplazamiento en profundidad supone tomar una decisión que mejora la configuración base correspondiente. Limitar esta dirección de búsqueda por tanto, conlleva directamente la pérdida de configuraciones mejores. El algoritmo implantado no realiza truncamientos del espacio de búsqueda en este sentido para no eliminar el óptimo, ya que cuando no existen mejoras el propio algoritmo limita la búsqueda al no presentar alternativas de reconfiguración.

Una excepción a la limitación del desplazamiento en profundidad se da cuando se permiten *empeoramientos de la función objetivo*. Para disminuir la probabilidad de obtener como solución sólo un óptimo local, el algoritmo permite un cierto número de empeoramientos (uno por defecto). El proceso en ese caso, sigue igual que antes, esto es, se selecciona primero el mejor (que en ese caso es peor que el que se tiene) dejando los demás nodos generados abiertos, hasta que se cumpla el número máximo de empeoramientos permitidos y no mejore la función objetivo, caso en el cual se devuelve la búsqueda para considerar los nodos abiertos (no expandidos) que todavía existan. En este caso limitar la búsqueda no es traumático pues se están truncando alternativas peores que las obtenidas.

Cada desplazamiento en anchura implica alejarse de la configuración que mejor se ve desde la configuración base. Moverse a la derecha en el árbol de búsqueda significa entonces, mantener en adelante el enlace para el cual se sabe que si se removiera se obtendría una configuración mejor. Esto obviamente, reduce las oportunidades de conseguir el óptimo en este subárbol. A medida que se avanza a la derecha en el árbol, por supuesto, es menos probable que esos nodos contengan el óptimo.

Una conclusión directa de este análisis corresponde a la necesidad de limitar el ancho del árbol de búsqueda. La experiencia con redes específicas determina el valor más apropiado para el ancho máximo de la búsqueda, de tal manera que las oportunidades de contener el óptimo global sean máximas, despreciando configuraciones irrelevantes desde este punto de vista. En los casos considerados, como se verá en el siguiente parágrafo, el máximo ancho necesitado fué de 2 para un caso bastante mallado, aunque normalmente el valor fué de 0. El óptimo se consiguió para todos los casos en una



estrecha franja del espacio de búsqueda; el algoritmo sin embargo toma por defecto un ancho igual a 2.

Una limitación adicional del espacio de búsqueda, que tiene una relación directa con la capacidad del equipo utilizado y con el tiempo total de proceso, corresponde al número máximo de evaluaciones (nodos del árbol). Esta limitación es posiblemente la más arbitraria pues no tiene relación directa con el problema, sino con la capacidad del equipo de cálculo empleado. Sin embargo, este criterio se podría utilizar para controlar el tiempo total de cálculo, considerando que es aproximadamente proporcional al número de evaluaciones realizadas. La organización de la búsqueda con la lógica de “*primero el mejor*” y la existencia del óptimo muy cerca de, o en la línea vertical de anchura cero típicamente, hace que para las redes y los equipos normales el óptimo, a pesar del corte, no se pierda.

Dependiendo de la experiencia del usuario con el algoritmo y/o con las redes, éste puede encontrar otros criterios heurísticos de truncamiento que le ayuden a reducir el espacio de búsqueda sin afectar grandemente su capacidad de encontrar el óptimo.

## Ejemplos de aplicación

Una labor importante para determinar la validez del método desarrollado y su algoritmo de implantación, tiene relación con los casos de prueba considerados.

En la tesis se han seleccionado tres tipos de casos, unos tomados de la bibliografía con el fin de determinar si el funcionamiento del algoritmo subsana las carencias observadas en métodos publicados; otros ideados con el fin de probar aspectos específicos de la implantación, y los últimos obtenidos con el objetivo de precisar características de utilización en redes reales.

Los ficheros de datos de los casos mostrados se encuentran en el apéndice 2 mientras que las características fundamentales se muestran en la Tabla 5.1. Aquí, las columnas corresponden, la primera al nombre de referencia dado a cada ejemplo; las cuatro siguientes a los números de: elementos, subestaciones en AT, alimentadores y lazos; y las dos últimas a las potencias activas y reactivas totales consumidas por sus respectivos

usuarios. Los ejemplos (filas de la tabla) están ordenados de acuerdo con el número de elementos de la red correspondiente.

Nombre	Número de elementos	Número de subestaciones	Número de alimentadores	Número de lazos	P (kW)	Q (kVAr)
Baldik	4	1	2	1	15000	10000
Dureza	9	1	1	1	31300	10000
Glamoc	13	1	3	4	5600	3720
Prueba	15	2	2	1	31300	18500
Contra	15	2	2	1	31300	28500
Conbas	16	2	2	2	31300	28500
Civanl	16	3	3	3	28700	17300
BaraWu	37	1	1	5	5084	2547
Augugl	47	4	4	7	15032	7355
Au1000	375	4	32	48	124666	60139
Ejreal	474	12	56	31	66940	42520

Tabla 5.1. Características genéricas de los casos considerados.

En todos los casos en que se dejó expandir el árbol de búsqueda suficientemente (los valores máximos necesarios correspondieron a una anchura de 2 y un empeoramiento permitido), se obtuvo la misma solución partiendo de diversas configuraciones iniciales, como se muestra más adelante. Esto se debe a la estrategia seguida para evitar caer en óptimos locales, centrada en tres características del algoritmo implantado:

- El desarrollo del árbol de búsqueda con base en el criterio de congelar la nueva rama cuando se avanza en profundidad.
- El permitir que la función objetivo empeore momentáneamente (empeoramientos).
- El permitir analizar opciones diferentes de la mejor (avanzar en anchura).

El tiempo de cálculo, en cambio, incrementó al partir de un punto más alejado del óptimo debido fundamentalmente, a la necesidad de realizar un mayor número de evaluaciones (nodos).

En la tabla se muestran para los casos considerados, los costes totales obtenidos para la configuración óptima (en pu\$, suponiendo que las tarifas cobradas en AT son iguales a 1 pu\$), los ahorros logrados en pta/hr (al precio estipulado para los distribuidores con tensiones  $\leq 36$  kV, esto es 8,43 pta/kWhr) y la reducción de pérdidas (en porcentaje de

las pérdidas correspondientes a la configuración inicial) obtenida con la reconfiguración óptima.

Nombre	Costes (pu\$)	Ahorros en los costes totales (pta/hr)	Reducción de pérdidas (%)	Comentario
Baldik	0,15641	758,7	12,31	Mejor que Glamocanin
Dureza	0,17978	202,32	2,99	Prueba de factibilidad
Glamoc	5,83994	71,06	3,39	Necesario 1 empeoramiento
Prueba	0,32316	370,92	4,15	Prueba de flujo de reactiva
Contra	0,32545	3161,25	23,15	Prueba de punteros
Conbas	0,32545	3161,25	23,15	Prueba de punteros
Civanl	0,2915	345,63	8,35	Igual que Civanlar
BaraWu	0,38471	458,59	29,17	Mejor que Baran y Goswami
Augugl	15,35417	166,16	14,51	Mejor que Augugliaro
Au1000	125,87422	10.909,35	51,17	Óptimo en ancho 2
Ejreal	7,08393	28409	10,91	Caso real

Tabla 5.2: Resultados globales para los casos de la Tabla 5.1.

El primer caso representa una red ficticia propuesta por Baldick en su discusión del artículo [Glamocanin-90], para probar que el criterio allí propuesto no conllevaba el óptimo global. Esta red a pesar de ser pequeña tiene la característica especial de tener alta potencia reactiva inyectada en nodos específicos. La solución aquí obtenida (óptima) fué mejor que la obtenida por el método de [Glamocanin-90], y se mostraron ambas en el capítulo 4.

Las redes Dureza, Prueba, Contra y Conbas se diseñaron con el fin de probar el manejo de la factibilidad, el comportamiento de los punteros, el impacto del flujo de potencia reactiva y la disponibilidad de alternativas adicionales en el proceso de reconfiguración. [Liu-89] planteó que para cargas uniformemente distribuidas a lo largo de un lazo, la función de pérdidas formaba una característica convexa con el punto de apertura del lazo. En las redes Contra y Conbas, se comprobó además que dicho criterio no se puede generalizar para casos normales en que se tienen cargas concentradas, en forma relativamente aleatoria, con muy diferentes valores, o con subredes diferentes conectadas aguas abajo.

La red Glamoc corresponde el ejemplo propuesto en [Glamocanin-90]. El mismo óptimo dado en la referencia se obtuvo, considerando un empeoramiento y mostrando de

paso la validez del criterio planteado anteriormente. El algoritmo propuesto, como se expresó anteriormente, permite el número de empeoramientos estipulado por el usuario del programa, pero toma por defecto 1.

El caso Barawu es tomado de la referencia [Baran-90] y se utilizó también en [Goswami-93]. Para esta red se obtuvo el óptimo mostrado en el capítulo 4, y que es mejor que la solución dada en las dos referencias.

El caso Ejreal es tomado del diagrama unifilar de una red grande, con unas condiciones de mallado relativamente normales en las redes de distribución, e ilustra para una red del orden de 70 MW totales, los ahorros que se pueden lograr al cambiar de una configuración aceptable a la óptima.

El caso Augugl fue propuesto en [Augugliaro-91] y se muestra en la figura 2; consiste de 47 elementos, 40 nudos o puntos de carga, y 7 enlaces. Para obtener la solución se partió de las siguientes configuraciones factibles:

(14 42 43 44 45 46 47)

(16 25 42 43 44 45 46)

(8 10 16 25 35 42 44)

y se obtuvo una configuración óptima dada por el estado: (10 12 14 32 43 45 47) con unas pérdidas de 116,17 kW. La solución óptima considerando como función objetivo tanto las pérdidas como los costes de compra mayorista (iguales para las 4 subestaciones a 1pu\$/puMWhr) es mejor que la obtenida en la citada referencia y se muestra en la Figura 5.10.

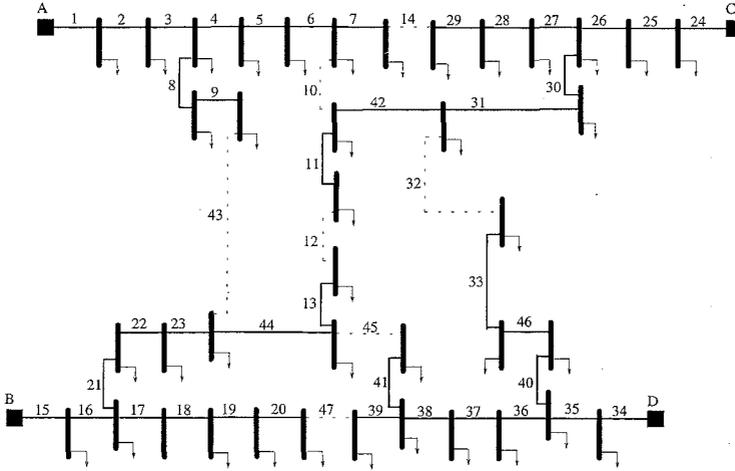


Figura 5.10. Red óptima para el ejemplo Augugl.

El árbol mostrado en la Figura 5.4 se obtuvo al tomar como configuración de partida (nodo 0) la definida por los enlaces 14, 42, 43, 44, 45, 46 y 47. Los costes para la configuración inicial fueron de 15,3739 pu\$ (el valor de 1 pu\$ tomado es de 8.430 pta/MWhr) y las pérdidas 122,31 kW. La búsqueda para el nodo 0 muestra que al cambiar enlaces en 6 lazos se mejora la configuración planteada inicialmente.

El árbol de búsqueda se describió anteriormente y corresponde al mostrado en la Figura 5.4 (y parcialmente en la Figura 5.9, y se da en la Tabla 5.3. El programa realizado tomó un segundo en realizar toda la búsqueda en un PC compatible 486/33 con 4 Mb de memoria.

Nodo	Cerrar	Abrir	Pérdidas	Costes	Padre
1	44	11	122.31	15.3603	0
2	45	12	127.21	15.3652	0
3	14	7	131.72	15.3697	0
4	42	10	133.34	15.3713	0
5	46	32	135.51	15.3715	0
6	43	9	134.35	15.3724	0
7	46	32	119.93	15.3579	1
8	42	10	122.28	15.3603	1
9	42	10	118.02	15.3560	7
10	14	7	119.00	15.3570	7
11	11	12	116.17	15.3542	9
12	11	12	118.37	15.3564	10
13	47	39	125.07	15.3631	2
14	14	7	125.87	15.3639	2
15	46	33	126.15	15.3642	2
16	42	10	126.69	15.3647	2
17	43	9	127.01	15.3650	2
18	46	32	123.70	15.3617	13
19	14	7	123.73	15.3618	13
20	42	10	124.55	15.3626	13
21	42	10	118.92	15.3569	18
22	14	7	121.12	15.3591	18
23	46	32	124.27	15.4623	14
24	42	10	123.75	15.3618	23
25	12	13	123.47	15.3615	24
26	7	29	123.72	15.3617	24
27	7	29	121.96	15.3600	25
28	42	10	124.47	15.3625	15
29	43	9	127.01	15.3640	15
30	33	32	122.07	15.3601	28
31	12	13	121.01	15.3590	30
32	46	32	128.10	15.3661	3
33	43	9	130.94	15.3690	3
34	42	10	125.58	15.3636	32
35	47	39	127.18	15.3652	32
36	43	9	127.32	15.3653	32
37	7	29	123.21	15.3612	34
38	47	39	124.66	15.3627	34
39	47	39	122.29	15.3603	37
40	43	9	127.11	15.3651	35
41	46	32	122.66	15.3607	4
42	47	39	121.75	15.3598	41
43	43	9	131.98	15.3700	5
44	47	39	132.59	15.3706	5
45	47	39	131.77	15.3698	43

Tabla 5.3. Descripción del árbol de búsqueda de la Figura 5.4.

Tomando en la misma red como función objetivo los costes de suministro en las subestaciones AT/MT, pero con la subestación C teniendo una tarifa de compra mayorista de 1,01 pu\$/MWhr (las otras siguen con el mismo precio), la solución óptima obliga a cargar esa subestación más débilmente que antes, como se muestra en la Figura

5.11. Nótese que teniendo en cuenta que la condición normal de los sistemas de distribución sería tener diferente coste de adquisición de energía al por mayor en cada punto de conexión, la minimización de pérdidas pierde el sentido como la función objetivo más idónea.

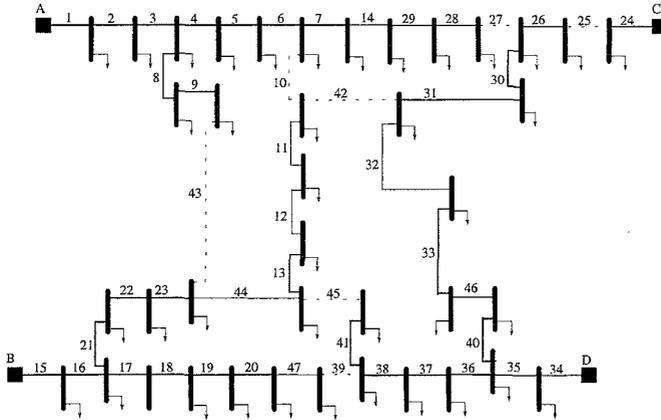


Figura 5.11. Solución obtenida cuando los costes de la subestación C son 1,01 veces los de cada una de las otras subestaciones.

El utilizar como función objetivo la diferencia entre los ingresos obtenidos por la empresa (cuando los consumidores están sometidos a tarificación puntual y la empresa recibe sus pagos como ingresos) y los costes de adquisición mayorista de energía, lleva a la solución mostrada en la Figura 5.12 en la cual se observa la característica de la empresa de realizar una explotación inadecuada de la red para lograr imponer unas tarifas altas y por ello incrementar sus ingresos. Esta condición se presenta debido a que una regulación que así definiera la remuneración de la empresa distribuidora permitiría incentivos perversos al aceptar que un ente con poder de mercado funcionase con criterios de mercado libre, y muestra la importancia de tener una regulación adecuada de la empresa de distribución-red, como se expresó en el capítulo 3.

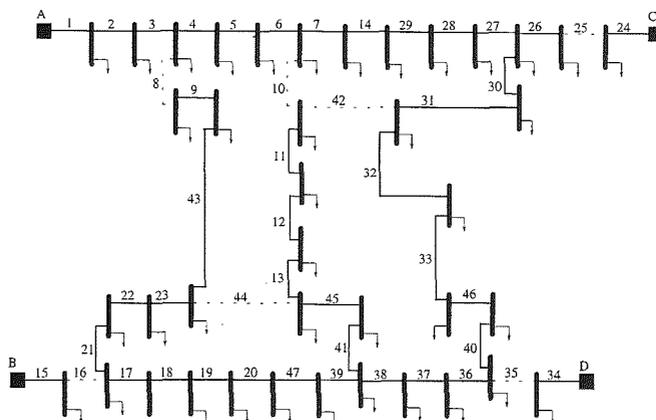


Figura 5.12. Configuración obtenida al permitir que la empresa que opera la red reciba como ingresos los pagos de los consumidores y cuyos costes sean los de compra mayorista.

El caso ejemplo Au1000 consistió en una red real de distribución con 375 elementos, 38 alimentadores, y 48 lazos (bastante mallada), diseñada a partir de la pequeña red Augugl. El consumo de potencia es del orden de 124,67 MW y 60,14MVA<sub>r</sub>. Las características más relevantes obtenidas al correr el programa teniendo como función objetivo las pérdidas se resumen en la Tabla 5.4.

Ancho Máximo	Ancho Solución	# evaluaciones	Pérdidas.
0	0	0 (Base)	2,50232
0	0	31	1,20885
1	1	427	1,20858
2	2	4599	1,20796
3	2	33644	1,20796
4	2	195201	1,20796

Tabla 5.4. Análisis del comportamiento del algoritmo para un ejemplo de 375 elementos, 38 alimentadores y 48 lazos.

En la primera columna se tiene el ancho máximo permitido, mientras que la segunda da el ancho en que se encuentra la solución. Allí se puede ver que el óptimo se logra en un

ancho de dos y que incrementar el ancho permitido incrementa exponencialmente el número de evaluaciones innecesariamente, pues de ahí en adelante se vuelve irrelevante. La tercera columna da el número de nodos de búsqueda o búsquedas locales realizadas en cada caso. La cuarta columna da el valor de las pérdidas en MW para la mejor solución obtenida en cada caso. Con un ancho de 2, la ejecución del programa se demoró 21 minutos en el mismo PC referido antes, y 3 minutos en una estación VAX 4090.

---

## Procesamiento paralelo

---

El paralelismo es una forma de resolver ciertos problemas complejos de forma rápida. Los programas paralelos funcionan bajo la filosofía de la división de un problema en tareas manejables y se han hecho populares por el incremento de la eficiencia de los cálculos distribuidos a través de los diferentes procesadores.

Por ello, [Peña-94] realizó la implantación del algoritmo propuesto en este capítulo utilizando la red de ordenadores con sistema operativo UNIX existente en el Instituto de Investigación Tecnológica y el entorno de procesamiento paralelo conformado por PVM [Geist-94] y HeNCE [Beguelin-94].

A continuación se describe someramente la filosofía de procesamiento paralelo (resumido de [Peña-94]), se muestra el programa gráfico implantado y se analiza la experiencia de su aplicación.

PVM es un grupo de programas que permite trabajar la red de comunicaciones y los ordenadores incluidos en el proceso como una sola máquina (máquina virtual paralela o por las siglas en inglés PVM). Hacer la programación directamente en PVM [Geist-94], sin embargo, necesita mucho conocimiento de los procesos y protocolos de comunicación, de las características de las máquinas, y del lenguaje empleado. El entorno gráfico HeNCE [Beguelin-94] simplifica bastante el proceso pues permite la programación de los procesos PVM a través de gráficos. La programación se centra bastante en el manejo tanto de los nodos (asociadas con las rutinas) del programa gráfico como de los datos de entrada y salida de dichos nodos.

---

Un cálculo paralelo se modela en PVM como un **sistema de tareas**, con relaciones de precedencia expresadas en forma de grafos acíclicos direccionados tipo serie-paralelo. Una tarea corresponde a una secuencia de instrucciones ejecutada por un procesador y se especifica según sus demandas de servicio sobre los recursos físicos. Una tarea puede iniciar su ejecución tan pronto como todos sus parientes hayan finalizado. Una vez iniciado su trabajo, la tarea compete con otras que se ejecutan concurrentemente por la utilización de los recursos físicos.

La programación paralela debe tener en cuenta:

- **Granularidad en las tareas.** Razón entre el número de “bytes” recibidos por un proceso y el número de operaciones de punto flotante que él mismo realiza.
- **Número de mensajes enviados.** Utilizar mensajes grandes para enviar un conjunto de “bytes” reduce el tiempo total de arranque sin crecimiento en el tiempo total de ejecución.
- **Tipo de paralelismo.** Tener en cuenta si la aplicación se puede dirigir mejor hacia el paralelismo funcional o hacia el paralelismo de datos. En el paralelismo funcional se paralelizan funciones mientras que en el de datos se paraleliza el procesamiento de los datos.

Un programa paralelo compartirá la red con otros usuarios. Este entorno multitarea, multiusuario, afecta el funcionamiento del mismo en aspectos relacionados con procesos de comunicación y con el cálculo en sí. Se debe tener en cuenta el efecto de contar con diferentes potencias de cálculo entre las máquinas de la configuración, y la carga que en un momento dado esté recibiendo cada una de ellas.

Los procesos disponibles en HeNCE se muestran en la Figura 5.13. El círculo representa una subrutina para el cálculo secuencial, mientras que los iconos que aparecen por pares representan procesos especiales y definen el flujo de control.

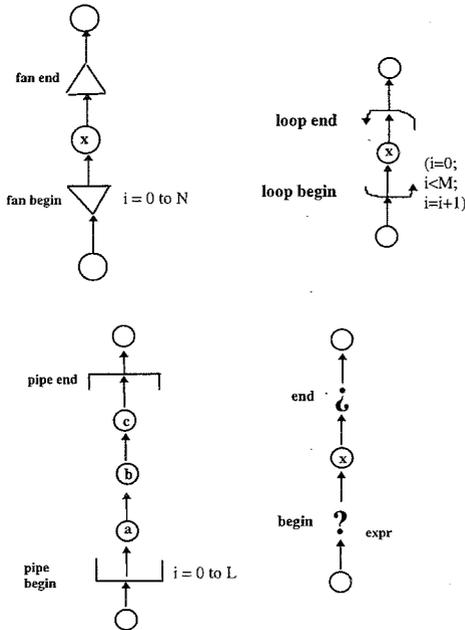


Figura 5.13. Procesos disponibles para realizar el paralelismo de programas de ordenador.

[Peña-94] sometió el método de reconfiguración descrito al proceso de paralelización siguiendo las etapas:

- Realizar el estudio del programa de reconfiguración.
- Analizar en forma dinámica y detallada la lógica impuesta para la captura de datos, desarrollo de cálculos y obtención de resultados.
- Seccionar el programa en subrutinas separadas para procesos de entrada/salida, asignación y cálculos.
- Realizar la programación en paralelo.
- Compilar y ejecutar los programas.

- Probar la funcionalidad del algoritmo con el ejemplo dado en [Augugliaro-91].  
obteniéndose resultados ligeramente más rápidos que en la forma secuencial clásica.

La secuencia del programa paralelo implantado se muestra en la Figura 5.14.

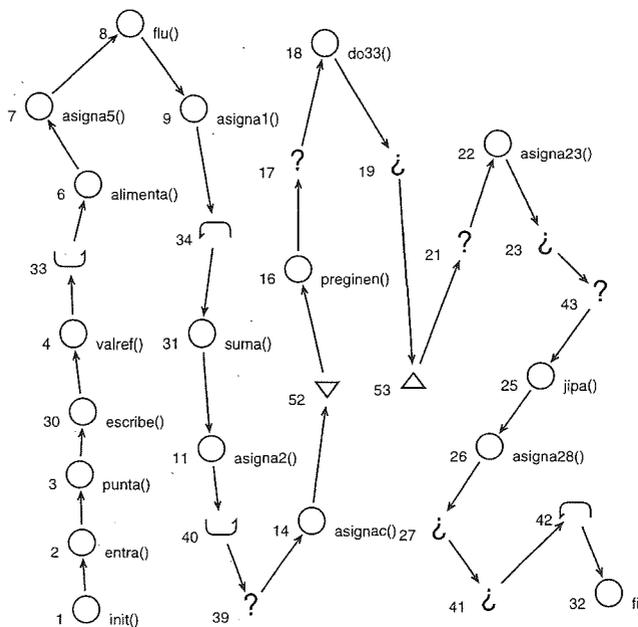


Figura 5.14. Programa de reconfiguración paralelo.

El proceso de convertir a paralelo este programa fué muy dispendioso, e implicó en algunas partes la pérdida de opciones paralelizables debido a que el programa se había desarrollado para que fuera eficiente en el proceso secuencial. Por ello y por los tiempos de comunicación requeridos, la implantación paralela de la reconfiguración óptima mejoró sólo ligeramente la rapidez del programa secuencial (de 0,53 s a 0,49 s para el ejemplo cuyo árbol corresponde a la Figura 5.4).

Por estas razones se considera que un programa paralelo se debe estructurar desde el principio con la filosofía de atomización de procesos y de optimización de recursos propia de esta filosofía. La aplicación se puede realizar con cualquiera de los métodos descritos en el capítulo 4 pero se piensa que métodos cuya filosofía es por principio, paralela como el *simulated annealing* o los algoritmos genéticos pueden dar resultados especialmente buenos.

---

---

# **Capítulo 6**

## **FUNCIÓN DE EVALUACIÓN**

---



---

## Introducción

---

Una faceta fundamental en el análisis de los sistemas eléctricos se refiere al estudio del comportamiento del sistema en unas condiciones determinadas. Es muy importante realizar este estudio correcta y eficientemente en casos, como el tratado en esta tesis, que requieren de una gran cantidad de evaluaciones para justipreciar las opciones consideradas.

En etapas normales de funcionamiento, el estado del sistema se obtiene por medio de programas de ordenador denominados, comúnmente, de flujo de cargas. En los sistemas de distribución, estos programas se deben diseñar de forma que se pueda aprovechar la característica radial con que se explotan sus redes. Esto es necesario, por supuesto, para incrementar la eficiencia de cálculo y disminuir las exigencias computacionales.

La representación de la apertura de los sistemas eléctricos a las condiciones del mercado que se considera en esta tesis, requieren que la determinación del estado de las redes, esto es, el citado flujo de cargas radial, incluya las relaciones especiales existentes entre las variables electrotécnicas y las económicas.

En este capítulo se describe una técnica eficiente de realizar el flujo de cargas radial, se muestra una forma de evaluar los precios puntuales en el alimentador y, finalmente, se propone una función de evaluación.

---

## Flujo de cargas radial

---

### Generalidades

El cálculo tanto del estado del sistema eléctrico como de los flujos de potencia (y/o corriente) por las líneas, comúnmente llamado “Flujo de Cargas”, se ha vuelto completamente imprescindible en la determinación de las condiciones de trabajo de los sistemas eléctricos. En los sistemas de distribución ha cobrado vida propia sólo en la última década.

Los métodos usados inicialmente seguían técnicas propicias para sistemas mallados de generación y transporte [Stagg-68, Tinney-67, Stott-74, Carrillo-84, Tripathy-82,

---

Luo-90, Quintana-91], conocidas como Gauss-Seidel y Newton-Raphson en cualquiera de sus formas: normal, desacoplada o desacoplada con alta relación R/X. Algunas de estas aproximaciones incluían correcciones para facilitar su uso en distribución [Quintana -91].

Estas técnicas hacen suposiciones, contienen simplificaciones o tienen características [Wood-82] que en general no son válidas en redes de media tensión. Adicionalmente, no incluyen en su desarrollo características específicas de los sistemas de distribución tales como la exigencia de operarlos en forma radial o la dinámica carga-condiciones de red. Como consecuencia requieren más memoria y tiempo de cálculo que los propuestos específicamente para usar en distribución, pueden dar una solución incorrecta debido a las aproximaciones inválidas usadas, o pueden diverger, no obteniendo ninguna solución. A pesar de ello, autores como [Borozan-95], aún hoy, utilizan técnicas propias de flujos de cargas mallados en los sistemas de distribución. Autores como [Luo-90, Shirmohammadi-91 y Roldán-93] por el contrario, usan técnicas de flujos de cargas radiales para calcular sistemas ligeramente mallados.

Los métodos de solución del flujo de cargas radial se pueden clasificar así:

- Escalera o Gauss-Seidel topológicamente orientado.
- Newton-Raphson desacoplado radial.

El flujo de cargas radial por el método de escalera es muy eficiente en memoria y tiempo de cálculo para redes pequeñas. Aquél que sigue el método de Newton-Raphson desacoplado radial [Chiang-90-a y Chiang-90-b], por el contrario, requiere más memoria de computador, es más lento para redes pequeñas y, la representación de la red es muy difícil de ajustar en el proceso de reconfiguración.

En esta tesis se pretenden evaluar sistemas de distribución equilibrados que operan en forma radial. Por ello y considerando que el flujo de cargas radial se resuelve siempre por alimentadores, el método de Gauss-Seidel topológicamente orientado se seleccionó como la mejor opción a utilizar y se detallará a continuación.

## Método de Gauss-Seidel topológicamente orientado

El método de Gauss-Seidel topológicamente orientado resuelve el problema del flujo de cargas en una red radial de forma iterativa [Rajagopalan-78, Lin-87, Lin-89, Céspedes-90, Glamocanin-90 y Chiang-90-a]. El proceso consiste en realizar iterativamente dos tareas:

- Recorrer los alimentadores hacia la carga (aguas abajo) calculando tensiones y potencias (en caso de ser dependientes de la tensión).
- Recorrer los alimentadores hacia la subestación (aguas arriba) calculando flujos de potencia, corrientes y pérdidas.

El problema se considera resuelto cuando el proceso iterativo converge, esto es, cuando el mayor error entre dos valores consecutivos de la tensión de nudo (o de la función a evaluar) es menor que un valor predeterminado muy pequeño.

Un aporte significativo de [Rajagopalan-78] y aplicado satisfactoriamente por [Céspedes-90] consiste en la nomenclatura utilizada. Ésta se basa en la asignación de un número identificador a cada rama, que coincide con el número identificador de uno de sus nodos terminales. Esto permite la identificación del alimentador por medio de un vector de conectividad, que para cada elemento guarda el número de la otra barra terminal (aquella que no lo identifica como se puede ver en la Figura 6.1).

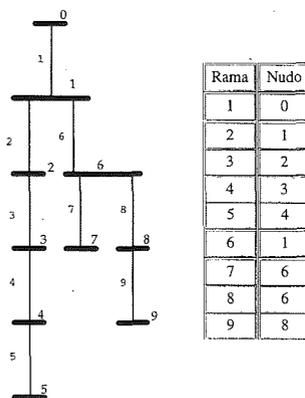


Figura 6.1. Alimentador de distribución y vector de conectividad.

[Céspedes-90] recomienda asignarles inicialmente a todos los nudos del alimentador la tensión especificada en su correspondiente subestación, en lugar del clásico valor de 1 pu para los nudos del alimentador.

El flujo de carga usado en [Glamocanin-90] es muy similar al anterior pero trabaja con corrientes de rama en lugar de potencias. Esto puede ser una ventaja cuando se deben revisar constantemente los límites térmicos de las líneas, pero puede conllevar cálculos adicionales si la actualización se hace en potencias.

[Lin-87] plantea un método diferente en su presentación pero muy similar en su desarrollo. Allí, las corrientes de lazo se hacen concordar con las de las cargas y a partir de ese punto, el proceso sigue en la misma forma anterior.

También en [Chiang-90-a] se presenta un proceso similar al anterior pero bastante restringido pues no tiene en cuenta la ocurrencia de derivaciones. Para permitir su existencia es necesario, por tanto, ajustar la nomenclatura utilizada.

El método desarrollado en la tesis se basa en la nomenclatura dada en [Rajagopalan-78] y se puede describir por el siguiente conjunto de tareas:

- Determinar
  - ◆ Topología de la red.
  - ◆ Vector de conectividad  $NF_i$
- Inicializar aguas abajo
  - ◆ Tensiones en el valor de la subestación  $V_i = V_{NF_i}$
  - ◆ Potencias activas y reactivas en sus valores base.
- Acumular aguas arriba
  - ◆ Pérdidas complejas.
  - ◆ Flujos de potencia por los tramos.
- Actualizar aguas abajo
  - ◆ Tensiones.
  - ◆ Potencias activas y reactivas.
- Verificar convergencia: en caso contrario volver a acumular y repetir el proceso a partir de ahí.

Dentro del proceso se puede considerar el efecto de las restricciones en las etapas de:

- a) Acumulación, si corresponde a una violación del flujo de potencia por los tramos, y
- b) Actualización, si corresponde a una violación de tensión en los nudos.

Cuando el flujo de cargas se evalúa para determinar las condiciones de la red, la violación de una restricción debe motivar solamente su identificación. Por el contrario, si el flujo de cargas se está realizando para explotar o planificar una red, la violación de una restricción se debe identificar y corregir.

El flujo de cargas radial implantado sólo evalúa el estado de la red en las condiciones existentes (buenas o no) e identifica la violación de las restricciones. La función de evaluación, que se propone más adelante, adecua la operación de la red a las condiciones de factibilidad operativa de acuerdo con la función de utilidad del consumidor.

### Ejemplo

El proceso descrito se realizó para la red de la Figura 6.2. Los datos utilizados (tomados de [Baran-89]) se muestran en la Tabla 6.1.

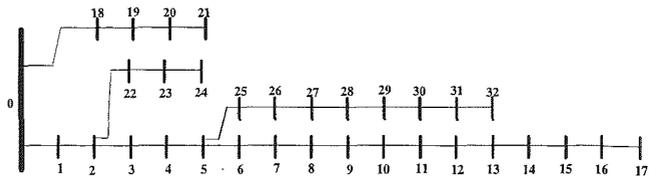


Figura 6.2. Red ejemplo tomada de [Baran-89].

Los resultados de la primera iteración se muestran en la Tabla 6.2, en donde las pérdidas activas son de 0,176 puMW (que corresponden a la suma de los términos de la quinta columna de la Tabla 6.2). Los resultados finales, obtenidos después de 4 iteraciones, se muestran en la Tabla 6.3. Las pérdidas activas, en este caso, son de 0,2021 puMW.

Nudo de envío	Nudo de recepción	R (pu $\Omega$ )	X (pu $\Omega$ )	P <sub>recepción</sub> (pu MW)	Q <sub>recepción</sub> (pu MVar)	QC <sub>recepción</sub> (pu MVar)
Substac_0	Nudo___1	0,0057	0,0029	0,0100	0,0060	0
Nudo___1	Nudo___2	0,0306	0,0157	0,0090	0,0040	0
Nudo___2	Nudo___3	0,0228	0,0116	0,0120	0,0080	0
Nudo___3	Nudo___4	0,0238	0,0121	0,0060	0,0030	0
Nudo___4	Nudo___5	0,0511	0,0441	0,0060	0,0020	0
Nudo___5	Nudo___6	0,0117	0,0386	0,0200	0,0100	0
Nudo___6	Nudo___7	0,0444	0,0147	0,0200	0,0100	0
Nudo___7	Nudo___8	0,0643	0,0462	0,0060	0,0020	0
Nudo___8	Nudo___9	0,0651	0,0462	0,0060	0,0020	0
Nudo___9	Nudo___10	0,0123	0,0041	0,0045	0,0030	0
Nudo___10	Nudo___11	0,0234	0,0077	0,0060	0,0035	0
Nudo___11	Nudo___12	0,0916	0,0721	0,0060	0,0035	0
Nudo___12	Nudo___13	0,0338	0,0445	0,0120	0,0080	0
Nudo___13	Nudo___14	0,0369	0,0328	0,0060	0,0010	0
Nudo___14	Nudo___15	0,0466	0,0340	0,0060	0,0020	0
Nudo___15	Nudo___16	0,0804	0,1074	0,0060	0,0020	0
Nudo___16	Nudo___17	0,0457	0,0358	0,0090	0,0040	0
Nudo___1	Nudo___18	0,0102	0,0098	0,0090	0,0040	0
Nudo___18	Nudo___19	0,0939	0,0846	0,0090	0,0040	0
Nudo___19	Nudo___20	0,0255	0,0298	0,0090	0,0040	0
Nudo___20	Nudo___21	0,0442	0,0585	0,0090	0,0040	0
Nudo___2	Nudo___22	0,0282	0,0192	0,0090	0,0050	0
Nudo___22	Nudo___23	0,0560	0,0442	0,0420	0,0200	0
Nudo___23	Nudo___24	0,0559	0,0437	0,0420	0,0200	0
Nudo___5	Nudo___25	0,0127	0,0065	0,0060	0,0025	0
Nudo___25	Nudo___26	0,0177	0,0090	0,0060	0,0025	0
Nudo___26	Nudo___27	0,0661	0,0583	0,0060	0,0020	0
Nudo___27	Nudo___28	0,0502	0,0437	0,0120	0,0070	0
Nudo___28	Nudo___29	0,0317	0,0161	0,0200	0,0600	0
Nudo___29	Nudo___30	0,0608	0,0601	-0,0150	0,0070	0
Nudo___30	Nudo___31	0,0194	0,0226	0,0210	0,0100	0
Nudo___31	Nudo___32	0,0213	0,0331	0,0060	0,0040	0

Tabla 6.1. Datos de la red tomada de [Baran-89].

En la primera fila mostrada se incluye la subestación como un elemento adicional. Esto permite, en caso de necesidad, considerar las pérdidas y la restricción de capacidad de la subestación.

Nudo de envío	Nudo de recepción	V pu V	Pérdidas / tramo	
			pu MW	puMVAr
Referencia	Subestac_0	1,0000	.	.
Subestac_0	Nudo_1	0,9971	0,0011	0,0006
Nudo_1	Nudo_2	0,9831	0,0046	0,0023
Nudo_1	Nudo_18	0,9966	0,0000	0,0000
Nudo_2	Nudo_3	0,9757	0,0017	0,0009
Nudo_2	Nudo_22	0,9796	0,0003	0,0002
Nudo_18	Nudo_19	0,9930	0,0001	0,0001
Nudo_3	Nudo_4	0,9684	0,0016	0,0008
Nudo_22	Nudo_23	0,9729	0,0005	0,0004
Nudo_19	Nudo_20	0,9923	<	<
Nudo_4	Nudo_5	0,9501	0,0033	0,0028
Nudo_23	Nudo_24	0,9696	0,0001	0,0001
Nudo_20	Nudo_21	0,9916	0,0000	0,0000
Nudo_5	Nudo_6	0,9466	0,0002	0,0005
Nudo_5	Nudo_25	0,9482	0,0002	0,0001
Nudo_6	Nudo_7	0,9418	0,0004	0,0001
Nudo_25	Nudo_26	0,9456	0,0003	0,0001
Nudo_7	Nudo_8	0,9356	0,0004	0,0003
Nudo_26	Nudo_27	0,9342	0,0010	0,0008
Nudo_8	Nudo_9	0,9298	0,0003	0,0002
Nudo_27	Nudo_28	0,9261	0,0007	0,0006
Nudo_9	Nudo_10	0,9289	<	<
Nudo_28	Nudo_29	0,9225	0,0003	0,0002
Nudo_10	Nudo_11	0,9274	0,0001	<
Nudo_29	Nudo_30	0,9183	0,0001	0,0001
Nudo_11	Nudo_12	0,9213	0,0002	0,0002
Nudo_30	Nudo_31	0,9174	<	<
Nudo_12	Nudo_13	0,9191	0,0001	0,0001
Nudo_31	Nudo_32	0,9171	<	<
Nudo_13	Nudo_14	0,9176	<	<
Nudo_14	Nudo_15	0,9163	<	<
Nudo_15	Nudo_16	0,9142	<	<
Nudo_16	Nudo_17	0,9136	<	<

Tabla 6.2. Resultados de la primera iteración para la red ejemplo (los términos con < contienen valores < de  $0,5 \cdot 10^{-4}$ ).

Nudo de envío	Nudo de recepción	V pu V	Pérdidas / tramo	
			pu MW	puMVA <sub>r</sub>
Referencia	Substac_0	1,0000	.	.
Substac_0	Nudo_1	0,9971	0,0012	0,0006
Nudo_1	Nudo_2	0,9830	0,0051	0,0026
Nudo_1	Nudo_18	0,9965	<	<
Nudo_2	Nudo_3	0,9755	0,0020	0,0010
Nudo_2	Nudo_22	0,9794	0,0003	0,0002
Nudo_18	Nudo_19	0,9930	0,0001	0,0001
Nudo_3	Nudo_4	0,9681	0,0019	0,0010
Nudo_22	Nudo_23	0,9728	0,0005	0,0004
Nudo_19	Nudo_20	0,9923	<	<
Nudo_4	Nudo_5	0,9498	0,0038	0,0033
Nudo_23	Nudo_24	0,9694	0,0001	0,0001
Nudo_20	Nudo_21	0,9916	<	<
Nudo_5	Nudo_6	0,9463	0,0002	0,0006
Nudo_5	Nudo_25	0,9478	0,0003	0,0001
Nudo_6	Nudo_7	0,9414	0,0005	0,0002
Nudo_25	Nudo_26	0,9453	0,0003	0,0002
Nudo_7	Nudo_8	0,9351	0,0004	0,0003
Nudo_26	Nudo_27	0,9338	0,0011	0,0010
Nudo_8	Nudo_9	0,9293	0,0004	0,0003
Nudo_27	Nudo_28	0,9256	0,0008	0,0007
Nudo_9	Nudo_10	0,9285	0,0001	<
Nudo_28	Nudo_29	0,9220	0,0004	0,0002
Nudo_10	Nudo_11	0,9270	0,0001	<
Nudo_29	Nudo_30	0,9179	0,0002	0,0002
Nudo_11	Nudo_12	0,9209	0,0003	0,0002
Nudo_30	Nudo_31	0,9170	<	<
Nudo_12	Nudo_13	0,9186	0,0001	0,0001
Nudo_31	Nudo_32	0,9167	<	<
Nudo_13	Nudo_14	0,9172	<	<
Nudo_14	Nudo_15	0,9158	<	<
Nudo_15	Nudo_16	0,9138	<	<
Nudo_16	Nudo_17	0,9132	<	<

Tabla 6.3. Resultados obtenidos para la red ejemplo.

### Flujo de cargas radial aproximado

En el proceso de reconfiguración óptima, dependiendo de las redes utilizadas y/o de la amplitud de la búsqueda deseada, es en general necesario evaluar un elevado número de veces el flujo de cargas radial. Para la red AU1000 descrita en el capítulo 5, por ejemplo, cuando se le permitió un ancho máximo de 4 a la búsqueda, el número de flujos de cargas radiales evaluados superó el millón.

Como se puede observar, para un sistema de distribución de tamaño moderado, realizar un análisis preciso de flujos de cargas para todas las condiciones posibles de conmutación de la red (como se planteó en el capítulo 2) no sólo es extremadamente ineficiente desde el punto de vista computacional, sino completamente irreal [Chang-94]. Cuando se sigue una estrategia con estas características, un flujo de cargas aproximado se vuelve obligatorio.

En el proceso de reconfiguración, por ejemplo, las potencias y las tensiones en las cargas cambian de un caso a otro. Sin embargo, en condiciones normales de operación tienen un valor cercano al valor base (si la tensión de la subestación es 1 pu, las tensiones de los nudos estarán cerca de ese valor y las potencias serán también cercanas a la potencia correspondiente a la tensión de 1 pu). Cuanto mejor sea la operación del sistema en lo que respecta al nivel de tensiones, esta consideración será aún más válida.

En el capítulo 2 se dieron las expresiones para los flujos de potencias por la rama  $l$  del alimentador  $j$  correspondiente a la subestación  $k$ , como:

$$PR_{ijl} = \sum_{k \in g(l)} PR_{ijk} + r_{ijk} \frac{PR_{ijk}^2 + QR_{ijk}^2}{V_{ijk}^2} + P_{ijk} \quad (1)$$

$$QR_{ijl} = \sum_{k \in g(l)} QR_{ijk} + x_{ijk} \frac{PR_{ijk}^2 + QR_{ijk}^2}{V_{ijk}^2} + Q_{ijk} - QC_{ijk} \quad (2)$$

Estas ecuaciones se aplican ahora de forma iterativa, ya que la evaluación de la tensión depende de los flujos de potencia por el tramo (y por tanto de las potencias de las cargas) y un ajuste de la tensión implica diferentes potencias en las cargas y, por tanto, de los flujos de potencia. Si la tensión se considera constante, las potencias en las cargas serán también constantes, y el proceso iterativo se elimina, quedando las ecuaciones (1) y (2) convertidas en:

$$PR_{ijl} = \sum_{k \in g(l)} PR_{ijk} + KR_{ijk} \cdot (PR_{ijk}^2 + QR_{ijk}^2) + P_{ijk} \quad (3)$$

$$QR_{ijl} = \sum_{k \in g(l)} QR_{ijk} + KX_{ijk} \cdot (PR_{ijk}^2 + QR_{ijk}^2) + Q_{ijk} - QC_{ijk} \quad (4)$$

siendo  $KR=r/V^2$  y  $KX=x/V^2$ .

Estas expresiones ya no son iterativas, permitiendo realizar un sólo recorrido de evaluación y acelerando el proceso de cálculo grandemente.

La evaluación del flujo de cargas aproximado desarrollado en la tesis, para todas las redes ejemplo tomadas, supuso un error inferior al 1% (en la magnitud de la tensión) con respecto a su correspondiente evaluación con el flujo de cargas iterativo propuesto anteriormente.

---

## Cálculo de precios puntuales

---

### Generalidades

En este apartado se considera el método de cálculo de los precios puntuales orientado a la operación de los sistemas de distribución, en forma similar a [Murphy-93].

El interés de una tarificación basada en los precios puntuales (se llaman puntuales porque son válidos para un punto espacio-temporal) se debe a que promueve la eficiencia energética del sistema de distribución cuando se emplea correctamente. Esto se logra aplicando al consumidor una tarifa basada en el coste real de suministrarle electricidad de manera que pueda reaccionar variando la carga de acuerdo con el precio.

La representación de las subestaciones de alimentación de la red de distribución, para una potencia determinada, se realiza en el nudo de conexión por medio de dos valores: uno eléctrico, la tensión, y otro económico, el coste de la energía.

Para el tratamiento dado a la distribución en esta tesis, los valores de tensión y precio en los nudos de suministro son extrínsecos, y se pueden determinar por intermedio de la simulación realizada al sistema mallado de generación y transporte con programas de ordenador tales como JUANAC [Rivier-90] o PERLA [Latorre-92]. Por consiguiente, un paso previo a la utilización del algoritmo aquí desarrollado (si se quieren diferenciar las características técnicas y económicas de los distintos nudos) es el modelado tanto eléctrico como económico del sistema de potencia. Esto se puede expresar mediante una tabla que incluya los valores de tensión y precios obtenidos por medio de algunos de los citados programas, ante muy diversos puntos de funcionamiento.

---

Las condiciones específicas de optimalidad de la operación de la distribución, tal como se describió en el capítulo 3, se obtuvieron considerando dos entes con intereses propios, la empresa distribuidora, y los consumidores. La empresa se debe regular a fin de que funcione como un ente maximizador de los beneficios globales (la regulación debe asegurarse de ello, ya que la empresa, en general, es un ente maximizador de sus beneficios individuales, ver capítulo 3). Cada consumidor, por su parte, se considera maximizador de sus beneficios individuales, pero sometido a una tarifa acorde con el coste de suministrar su demanda instantánea, y actúa en forma desagregada. La empresa envía señales de precio y el consumidor responde con su consumo, como se ilustra en la Figura 6.3. Para la operación de la red de distribución basta con considerar los dos entes separadamente, comunicándose por señales de precio (empresa al consumidor) y de carga (consumidor a la empresa). Esta situación se muestra en la Figura 6.3.

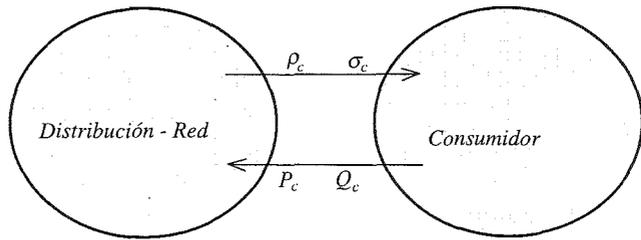


Figura 6.3. Interacción entre la distribuidora-red y el consumidor.

### Expresiones de los precios puntuales

Para determinar las condiciones de operación de la red de distribución en un momento dado, como se expresó antes, se cuenta con el intercambio de señales entre los dos entes involucrados de acuerdo con la regulación establecida.

Las expresiones de los precios puntuales se obtuvieron en forma genérica en el capítulo 3 como:

$$P_{thc} = \theta_{tha} \left( 1 + \frac{\partial LP_{tha}}{\partial P_{thc}} + \frac{\partial LQ_{tha}}{\partial P_{thc}} \right) + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial P_{thc}} \quad (5)$$

$$\sigma_{thc} = \delta_{tha} \left( 1 + \frac{\partial LQ_{tha}}{\partial Q_{thc}} + \frac{\partial LP_{tha}}{\partial Q_{thc}} \right) + \sum_l \pi_{thl} \cdot \frac{\partial R_{thl}}{\partial Q_{thc}} \quad (6)$$

Estas expresiones muestran que los precios puntuales en un nudo determinado dependen de los precios establecidos en la subestación de alimentación, de las pérdidas de potencia y de las restricciones activas en la red. Sin embargo, las expresiones (5) y (6) son de carácter teórico y no permiten calcular con facilidad el monto a establecer en un nudo determinado. Es necesario, por tanto, detallarlas de forma que faciliten realizar el cálculo secuencial.

La restricción dada por la expresión (7) expresa el límite térmico de la línea en la forma:

$$Termr_{ijc} \geq PR_{ijc}^2 + QR_{ijc}^2 \quad (7)$$

Las expresiones (5) y (6) se transforman al individualizar el proceso para el tramo  $c$  mediante las expresiones (1) y (2) en :

$$\rho_c = \rho_{nf(c)} + \frac{2 \cdot PR_c}{1 - 2 \cdot R_c \cdot PR_c - 2 \cdot X_c \cdot QR_c} \cdot [R_c \cdot \rho_{nf(c)} + X_c \cdot \sigma_{nf(c)}] + 2 \cdot \pi_c \cdot PR_c + \frac{4 \cdot \pi_c \cdot PR_c}{1 - 2 \cdot R_c \cdot PR_c - 2 \cdot X_c \cdot QR_c} \cdot [R_c \cdot QR_c + X_c \cdot PR_c] \quad (8)$$

$$\sigma_c = \sigma_{nf(c)} + \frac{2 \cdot QR_c}{1 - 2 \cdot R_c \cdot PR_c - 2 \cdot X_c \cdot QR_c} \cdot [R_c \cdot \rho_{nf(c)} + X_c \cdot \sigma_{nf(c)}] + 2 \cdot \pi_c \cdot QR_c + \frac{4 \cdot \pi_c \cdot QR_c}{1 - 2 \cdot R_c \cdot PR_c - 2 \cdot X_c \cdot QR_c} \cdot [R_c \cdot QR_c + X_c \cdot PR_c] \quad (9)$$

donde  $nf(c)$  identifica el nudo fuente o nudo padre del nudo (tramo)  $c$  considerado (es el vector de conectividad) y  $\rho$  y  $\sigma$  para la subestación corresponden a  $\theta$  y  $\delta$ .

Es importante hacer notar que las expresiones de los precios se logran expresar en términos de los datos del tramo alimentador y los precios del nudo aguas arriba. Esta característica facilita la implantación del cálculo de precios puntuales en el algoritmo planteado para la función de evaluación, la cual se considerará más adelante.

Si al consumidor se le cobran estos precios, él reacciona variando las potencias activa y reactiva consumidas de acuerdo con su función de utilidad, esto es, para un precio exigido por la energía, él demanda una potencia de manera que el beneficio marginal obtenido por su utilización iguale el coste marginal producido por ella (precio).

## Algoritmo

Las expresiones que se han presentado para el cálculo de los precios puntuales permiten su obtención en forma iterativa. La convergencia hacia la solución significa obtener un conjunto de demandas que satisfagan con un nivel de precisión prefijado las condiciones globales de optimalidad (establecidas para las demandas por medio de dichos precios).

El proceso de cálculo de los precios se puede expresar como:

- Calcular los precios en la subestación.
- Calcular secuencialmente, aguas abajo,
  - ◆ Precios a partir de las expresiones (8) y (9).
  - ◆ Potencias activa y reactiva (de acuerdo con la función de utilidad dada para cada uno de los consumidores).
  - ◆ Pérdidas complejas.
  - ◆ Flujo de potencia por el tramo (con base en las ecuaciones nodales).
- Verificar convergencia, en caso contrario volver a calcular los precios desde la subestación hacia la carga.

La mejor forma de ilustrar el proceso es a través de un ejemplo. Supóngase que para el alimentador de la Figura 6.4 se tiene una  $r = 0,00075 \text{ pu}\Omega$  y  $x = 0,002 \text{ pu}\Omega$ , que los costes de la subestación se obtienen de la expresión  $C=(PA^2+QA^2)/20$ , que los beneficios de cada consumidor se obtienen de la expresión  $b=\log[(1+P)(1+Q)]$ , y que las potencias activa y reactiva de la carga están relacionadas por la ecuación de conformidad de la carga  $h=P-5Q$ .

Considérese que no está activa ninguna restricción y que una solución previa permite conocer las potencias activa y reactiva en cabecera del alimentador como  $PA=6,9618 \text{ puMW}$  y  $QA=1,7358 \text{ puMVAr}$ .

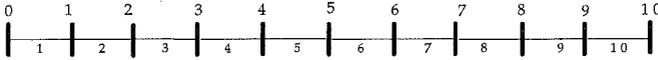


Figura 6.4. Alimentador tomado de [Murphy-93].

El proceso se comienza partiendo de la subestación con unos precios de:

$$\rho_0 = \theta = \partial C / \partial P A |_{P_A=6,9618} = 0,6962$$

$$\sigma_0 = \delta = \partial C / \partial Q A |_{Q_A=1,7358} = 0,1736$$

Con base en estos valores y en las expresiones dadas se calculan las pérdidas activas y reactivas y los flujos de potencia aguas abajo. Los valores obtenidos para los precios y potencias en los nudos se muestran en la Tabla 6.4.

Nudo	$\rho$	$\sigma$	P	Q
0	0,6962	0,1736	0	0
1	0,7054	0,1797	0,7612	0,1522
2	0,7137	0,1851	0,735	0,147
3	0,7211	0,1896	0,7124	0,1425
4	0,7275	0,1935	0,6932	0,1386
5	0,7331	0,1967	0,6772	0,1354
6	0,7376	0,1993	0,6640	0,1328
7	0,7413	0,2014	0,6537	0,1307
8	0,7440	0,2029	0,6461	0,1292
9	0,7459	0,2039	0,6411	0,1282
10	0,7468	0,2043	0,6386	0,1277

Tabla 6.4. Proceso de cálculo de precios.

Para el cálculo se tomaron las tensiones iguales a 1 pu, el mismo modelo de las cargas y las restricciones inactivas.

En la tabla se puede observar que el precio se incrementa y el consumo se disminuye a medida que se aleja de la subestación debido a la existencia de las pérdidas.

## **Función de evaluación propuesta**

El método de Gauss-Seidel guiado topológicamente se tomó como base para desarrollar la función de evaluación, porque es muy rápido, especialmente para redes pequeñas

como es el caso de los alimentadores. El método es, además, muy versátil ya que se puede utilizar como base para hacer evaluaciones más amplias que la simple consideración de las pérdidas, ver [Carrillo-94]. Se puede utilizar, por ejemplo, como base para calcular sistemas ligeramente mallados en forma similar al método utilizado por [Shirmahammadi-89 y Roldán-93] y se puede adaptar como en [Gómez-94] para considerar la inclusión de fuentes de generación eólica.

La función de evaluación propuesta en la tesis trasciende la simple evaluación del estado de la red o flujo de cargas radial, pues incluye no sólo el cálculo de los precios puntuales, sino también la dinámica carga-precio. La función propuesta permite, adicionalmente, extender la consideración de las pérdidas óhmicas, como factor determinante de la forma de explotación de la red, a los costes de operación o alguna otra medida de eficiencia más acorde con la regulación existente.

El proceso a seguir se puede establecer para la iteración  $i$  y el nudo  $m$  como:

- Determinar:
  - ◆ Topología de la red.
  - ◆ Vector conectividad  $nf_m$  (da el nudo fuente o nudo padre del nudo  $m$ ).
- Inicializar aguas abajo:
  - ◆ Tensiones de los nudos: al valor de la subestación:

$$V_i^0 = V_{S/E}$$

- ◆ Precios de los nudos: al valor de la subestación:

$$\rho_i^0 = \theta$$

$$\sigma_i^0 = \delta$$

- ◆ Potencias activas y reactivas a sus valores base:

$$P_i^0 = P(V_{S/E}, \theta)$$

$$Q_i^0 = Q(V_{S/E}, \theta)$$

- Acumular aguas arriba:

- ◆ Pérdidas complejas en el producto de la caída de tensión en el tramo por el conjugado de la corriente:

$$per^i = \Delta V^{i-1} * (I_m^{i-1})^*$$

- ◆ Flujos de potencia por el tramo:

$$SS_m^i = SS_m^i + S_m^{i-1} + per^i$$

- ◆ Flujos de potencia para los demás tramos (para cada  $j$  aguas arriba de  $m$ ):

$$SS_j^i = SS_j^i + S_m^{i-1} + per^i$$

- Actualizar aguas abajo:

- ◆ Caídas de tensión:

$$\Delta V^i = Z_m I_m^{i-1}$$

- ◆ Tensiones:

$$V_m^i = V_k^i - \Delta V^i \quad \text{siendo } k = nf_m$$

- ◆ Potencias complejas (activas y reactivas) en la carga.

$$S_m^i = S_m(V_m^i, \rho_m^i)$$

- ◆ Precios:

$$\rho_c = \rho_{nf(c)} + \frac{2 \cdot PR_c}{1 - 2 \cdot R_c \cdot PR_c - 2 \cdot X_c \cdot QR_c} \cdot [R_c \cdot \rho_{nf(c)} + X_c \cdot \sigma_{nf(c)}] +$$

$$+ 2 \cdot \pi_c \cdot PR_c + \frac{4 \cdot \pi_c \cdot PR_c}{1 - 2 \cdot R_c \cdot PR_c - 2 \cdot X_c \cdot QR_c} \cdot [R_c \cdot QR_c + X_c \cdot PR_c]$$

$$\sigma_c = \sigma_{nf(c)} + \frac{2 \cdot QR_c}{1 - 2 \cdot R_c \cdot PR_c - 2 \cdot X_c \cdot QR_c} \cdot [R_c \cdot \rho_{nf(c)} + X_c \cdot \sigma_{nf(c)}] +$$

$$+ 2 \cdot \pi_c \cdot QR_c + \frac{4 \cdot \pi_c \cdot QR_c}{1 - 2 \cdot R_c \cdot PR_c - 2 \cdot X_c \cdot QR_c} \cdot [R_c \cdot QR_c + X_c \cdot PR_c]$$

- Verificar convergencia: en caso contrario volver a acumular.

En la red de distribución, por efecto del alto consumo que pueda existir, se pueden activar restricciones de red. El método propuesto permite tenerlas en cuenta siguiendo la filosofía de cálculo presentada.

La sobrecarga en un tramo determinado, por ejemplo, se debe a que los consumidores situados aguas abajo demandan potencia que, agregada, supera el límite de dicho tramo. La solución a este problema, como se expresó en el capítulo 3, se obtiene al incrementar los precios cobrados a los causantes de la sobrecarga y mantener invariables los precios cobrados a los demás.

En caso de violarse una restricción, la secuencia que se debe seguir para desactivar la violación es similar a la planteada para realizar el cálculo general de la función de evaluación. La diferencia radica en que en el proceso de acumulación de potencias sí se detecta la sobrecarga, se para el proceso de acumulación, se incrementan los precios de los nudos aguas abajo con el fin de impulsar a los usuarios a reducir su carga, y se libera, de esta manera, la sobrecarga. Si esto no sucede se procede a incrementar nuevamente los precios, etc. hasta que se logre el objetivo, caso en el cual el proceso se continúa aguas arriba en la forma anteriormente descrita.

En caso de ocurrir una violación en el valor de regulación de tensión permitido, éste se detecta en el proceso de actualización aguas abajo. Inmediatamente, se corrigen los precios de manera que los consumidores reaccionen y ajusten sus potencias para eliminar la violación de la restricción. Si esto no se consigue se continúa el proceso hasta liberar la sobrecarga.

Para incrementar el precio en caso de violación de una restricción se utiliza su correspondiente multiplicador de Lagrange ( $\pi$ ). Sin embargo, el proceso requiere de un valor inicial que se puede fijar por experiencia, de acuerdo con una secuencia prefijada, o algún otro de la apetencia del usuario del algoritmo. Aquí se sugiere obtener un precio equivalente de activa y reactiva, suponer que ese es el valor en la condición de activación de la restricción, y extrapolarlo de acuerdo con el valor de la violación existente en la restricción, así:

$$\pi^0 = \sqrt{\rho^2 + \sigma^2} \cdot \frac{|\text{Valor} - \text{Limite}|}{\text{Limite}}$$

Para consumidores sometidos a precios fijos, como se expresó en el capítulo 3, el corte de carga lo realiza la empresa de distribución-red, mientras que aquéllos sometidos a precios puntuales reaccionan al precio de acuerdo con su función de utilidad.

---

---

# **Capítulo 7**

## **IMPLANTACIÓN**

---



---

## Introducción

---

Los métodos y algoritmos propuestos necesitan de una adecuada implantación informática para comprobar su funcionalidad. Esta implantación es difícil de realizar pues debe permitir ajustes de la topología manteniendo la factibilidad, cuando en la gran mayoría de las configuraciones posibles son invariables. Cuando se analiza cada nueva configuración, por ejemplo, se debe buscar la máxima eficiencia de cálculo posible, debido al elevado número de evaluaciones requeridas. Además, la implantación debe estar estructurada de forma que permita el ajuste de la función objetivo a las características de simulación deseadas.

En este capítulo se presentan, en primera medida, los aspectos informáticos, tales como la definición de punteros, la forma de generar los alimentadores a partir de los punteros, y la reconfiguración de la red. Posteriormente se presentan las formas de utilización del algoritmo desarrollado.

---

## Aspectos informáticos

---

### Punteros

En vista de la cantidad de cálculos y/o medios necesarios para obtener la forma de explotación óptima de la red de distribución, fue necesario el desarrollo de estrategias informáticas especiales que permitieran cumplir el objetivo planteado con una disposición limitada de recursos.

Una estrategia, relacionada directamente con el manejo de los datos existentes para su posterior utilización, consiste en el uso de punteros que permitan identificar la localización de los diferentes elementos en la red.

Esta estrategia es especialmente importante si se considera que en el contexto planteado en la tesis es necesario tener en cuenta diferentes configuraciones de la red de distribución y que, realizar los cambios necesarios, moviendo los datos de los elementos es absolutamente inaceptable.

---

Por esta razón, se ideó un sistema de punteros que identifica las posiciones relativas de los elementos, y que permite, en caso de reconfiguración, ajustar los punteros identificadores. Nótese que de esta forma se minimiza la transferencia de los datos de los elementos, además evita la variación de gran parte de estos identificadores, al afectar sólo unos pocos estrictamente necesarios.

Los punteros definidos permiten identificar los elementos adyacentes al elemento considerado en tres direcciones distintas: hacia arriba, hacia abajo y hacia el lado.

La dirección hacia arriba permite moverse por la red en dirección a la subestación y está dada por el puntero *nuant* (de nudo anterior). La dirección hacia abajo permite moverse por la red en dirección a la carga y está dada por el puntero *inpnc* (índice de primer nudo conectado). Finalmente la dirección horizontal o hacia el lado permite identificar los elementos conectados al mismo nudo y está dada por el puntero *inonc* (índice de otro nudo conectado).

En la Figura 7.1 se pueden identificar las tres direcciones indicadas para un nudo específico.

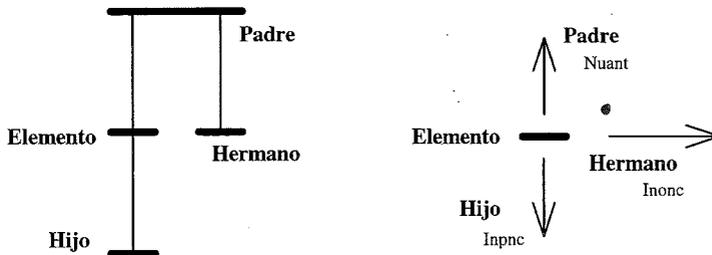


Figura 7.1. Punteros que permiten identificar los elementos adyacentes al elemento considerado.

La implantación informática debe tomar los datos de entrada y clasificarlos de manera que se puedan identificar y procesar posteriormente. En la Tabla 7.1 se recogen los datos de entrada para los elementos de la red ejemplo *Contra* (mostrada en la Figura 7.2). La primera columna de la tabla muestra el tipo de elemento tomado (En el fichero de datos se identifica el elemento con *TR* si es un tramo activo o rama y con *EN* si es un enlace). Las columnas segunda y tercera muestran los nombres dados a los nudos extremos: de envío y de recepción, respectivamente.

Las columnas cuarta y quinta incluyen su respectiva impedancia separada en sus partes R y X, las cuales están dadas en por unidad. Las columnas sexta y séptima muestran para el nudo de recepción (de la tercera columna) los valores de potencia activa y reactiva de la carga conectada, mientras que la columna octava incluye la potencia reactiva inyectada a la red por nudo de recepción. Finalmente la décima columna muestra la capacidad máxima de transporte permitida para el elemento en pu.

Tipo	Nomenv	Nomrec	R_tramo	X_tramo	PRec	QRec	QCRec	Smax
TR	alfa5	alfa10	0,0400	0,0400	0,0150	0,0120	0000,00	2,000
TR	alfa4	alfa8	0,0800	0,1100	0,0100	0,0090	0000,00	1,500
TR	S/E1	alfa1	0,0400	0,0400	0,0210	0,0100	0,0180	2,000
TR	alfa2	alfa4	0,1100	0,1100	0,0400	0,0270	0000,00	1,500
TR	alfa1	alfa3	0,1100	0,1100	0,0400	0,0270	0000,00	1,500
TR	alfa3	alfa5	0,0800	0,1100	0,0450	0,0200	0,0370	1,000
TR	alfa6	alfa11	0,1100	0,1100	0,0100	0,1090	0000,00	1,500
TR	alfa7	alfa12	0,0800	0,1100	0,0500	0,0300	0,1120	1,000
TR	S/E2	alfa2	0,1100	0,1100	0,0100	0,0090	0000,00	1,000
TR	alfa9	alfa14	0,1100	0,1100	0,0060	0,0010	0,0060	1,000
TR	alfa9	alfa13	0,1100	0,1100	0,0060	0,0010	0,0060	1,000
TR	alfa4	alfa9	0,0800	0,1100	0,0300	0,0150	0,0110	1,500
TR	alfa4	alfa7	0,0900	0,1800	0,0200	0,0080	0,0120	1,500
TR	alfa3	alfa6	0,0900	0,1200	0,0100	0,0070	0,0180	1,000
EN	alfa6	alfa7	0,0400	0,0400	0	0	0	2,000

Tabla 7.1. Datos de entrada de los elementos de la red ejemplo *Contra*.

La localización de un elemento en la red se realiza mediante comparación de los nombres de sus nudos de envío y recepción con aquéllos de los demás elementos.

Si se toma el elemento 6, por ejemplo, que tiene para el nudo de envío el nombre de *alfa3*, se puede obtener el valor de su puntero *nuant* al buscar dicho nombre en la columna 3 (esto es, estará conectado a aquél cuyo nudo de recepción es el mismo de envío del elemento considerado). En la posición (fila) 5 se encuentra el nombre *alfa3* como nudo de recepción, por lo cual  $nuant_6=5$ .

Para obtener el índice del primer nudo conectado aguas abajo del elemento *i*, o *inpnc<sub>i</sub>*, se busca el nombre del nudo de recepción (dado en *nomrec<sub>i</sub>*) en la columna que contiene los nombres de los nudos de envío (o *nomenv*) y el primer elemento encontrado (que tenga el nombre *nomrec<sub>i</sub>* en la columna 2) se almacena en *inpnc<sub>i</sub>*. Para el elemento 6, citado antes, el primer elemento con nombre *alfa5* en el nudo de envío se encuentra en la posición 1, por lo cual  $inpnc_6=1$ .

Para obtener el índice de otro nudo conectado al mismo nudo padre o *inonc*, se busca el siguiente elemento que también tenga en *nomenv* el nombre del nudo de envío del

elemento considerado. Para el elemento 6, buscado en los siguientes elementos de la tercera columna el nombre *alfa3*, se encuentra en la posición 14, por lo cual  $inonc_6=14$ .

Si el elemento anterior es la subestación, *nuant* es 0. Si no hay elemento alguno conectado aguas abajo, *inpc* es 0. Si no hay más elementos conectados al mismo nudo alimentador, *inonc* es 0. En la Tabla 7.2 se muestra: en la primera columna, el número de orden en que el elemento fue leído; en la segunda, el tipo de elemento leído (*TR* para rama y *EN* para enlace); en la tercera, el nombre del nudo de envío (*nomenv*); en la cuarta, el nombre del nudo de recepción (*nomrec*); en la quinta, el índice de primer nudo conectado aguas abajo (*inpc*); en la sexta, el índice de otro nudo conectado al mismo nudo padre (*inonc*); y finalmente, en la séptima, el índice que da el nudo anterior o nudo padre (*nuant*).

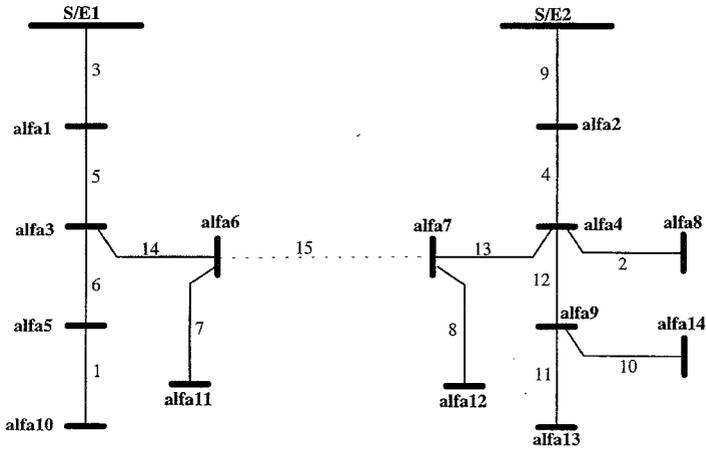


Figura 7.2. Red del ejemplo *Contra*.

Orden	Tipo	Nomenv	Nomrec	Inpnc	Inonc	Nuant
1	TR	alfa5	alfa10	0	0	6
2	TR	alfa4	alfa8	0	12	4
3	TR	S/E1	alfa1	5	0	0
4	TR	alfa2	alfa4	2	0	9
5	TR	alfa1	alfa3	6	0	3
6	TR	alfa3	alfa5	1	14	5
7	TR	alfa6	alfa11	0	0	14
8	TR	alfa7	alfa12	0	0	13
9	TR	S/E2	alfa2	4	0	0
10	TR	alfa9	alfa14	0	11	12
11	TR	alfa9	alfa13	0	0	12
12	TR	alfa4	alfa9	10	13	4
13	TR	alfa4	alfa7	8	0	4
14	TR	alfa3	alfa6	7	0	5
15	EN	alfa6	alfa7	0	0	0

Tabla 7.2. Punteros de la red de la Figura 7.2

### Generación de los alimentadores

El método propuesto en la tesis requiere la evaluación de la red bajo multitud de opciones de programación. Para evaluar las condiciones de operación del sistema, la red se puede dividir en alimentadores, que son unidades completas de distribución en vista de su forma de explotación radial. Adicionalmente, cuando se hace un cambio unitario en la configuración, se intercambian una rama y un enlace del mismo lazo, afectando por tanto sólo dos alimentadores.

Estas características han motivado el cálculo de la función de evaluación por alimentadores y, en el caso de la reconfiguración, que sólo se haga para los dos alimentadores que sufren cambios en las condiciones de operación. Con esta característica, para cada cambio en la red *AU1000*, por ejemplo, basta realizar los cálculos con dos alimentadores en lugar de los 48 que conforman la red.

Para lograr disminuir los cálculos de esta forma es necesario saber identificar los elementos que conforman los alimentadores para utilizarlos en los cálculos. Esto se logra con los punteros descritos en el párrafo anterior y con uno adicional, *inpa*, que identifica el elemento de cabecera del alimentador correspondiente a *inpnc*. Este nuevo puntero da la posición de los elementos conectados a la subestación, numerados de acuerdo con la posición en que los encuentra (el primero que encuentra lo tomará como cabecera del alimentador 1 y así sucesivamente, sin importar si es enlace o rama). Para

la red ejemplo o muestra se tiene  $inpa=[3,9]$ , esto es, el primer elemento del alimentador 1 es 3 y el primer elemento del alimentador 2 es 9.

Para desarrollar el alimentador se toma su primer elemento del puntero  $inpa$  (para el primer alimentador sería  $inpa_1=3$ ). A partir de este elemento se conecta el primer elemento acoplado a él, dado por  $inpnc_{inpa}$  (para el elemento 3 sería 5 pues  $inpnc_3=5$ ). Teniendo ya el primer elemento se mira cual otro elemento está conectado a él, dado por  $inonc_{inpnc}$  y se continúa en esta forma hasta que no haya más ( $inonc_5=0$ ).

Después de integrar todos los elementos conectados al de cabecera de línea, se continúa el proceso, en la misma forma ( $inpnc_5=6$ ,  $inonc_6=14$ ,  $inonc_{14}=0$ ) localizando los componentes del primer elemento conectado ( $inpnc_5=6$ ,  $inonc_6=14$ ,  $inonc_{14}=0$ ), luego del siguiente ( $inpnc_6=1$ ,  $inonc_1=0$ ), y así sucesivamente ( $inpnc_{14}=7$ ,  $inonc_7=0$ ) hasta que no haya más elementos por conectar. Este proceso se muestra en la Figura 7.3.

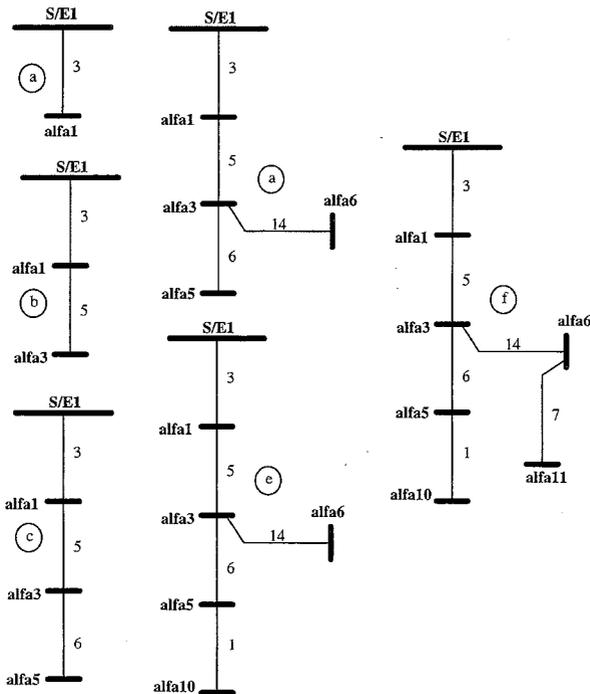


Figura 7.3. Proceso de construcción de un alimentador.

En la Tabla 7.3 se dan los alimentadores de la red ejemplo *Contra*. Allí se da también el vector de conectividad *nf*, que permite recorrer el alimentador hacia la subestación o hacia la carga según convenga. Como la generación del alimentador se hace a partir de la subestación, el *nf* se puede obtener fácilmente, asignándole el número dado al nudo padre, como se muestra en la tabla.

Alimentador 1			
Orden	nf	Nomenv	Nomrec
1	0	S/E1	alfa1
2	1	alfa1	alfa3
3	2	alfa3	alfa5
4	2	alfa3	alfa6
5	3	alfa5	alfa10
6	4	alfa6	alfa11

Alimentador 2			
Orden	nf	Nomenv	Nomrec
1	0	S/E2	alfa2
2	1	alfa2	alfa4
3	2	alfa4	alfa8
4	2	alfa4	alfa9
5	2	alfa4	alfa7
6	4	alfa9	alfa14
7	4	alfa9	alfa13
8	5	alfa7	alfa12

Tabla 7.3. Forma de generar los alimentadores asociados.

## Reconfiguración

El método global propuesto en la tesis hace uso sistemáticamente de la reconfiguración de alimentadores de distribución. La implantación eficiente de este proceso constituye, entonces, una premisa fundamental para el desarrollo global del algoritmo.

Sin embargo, reconfigurar la red (intercambiar en forma factible enlaces por ramas) corresponde, en este contexto informático, tan sólo a cambiar los valores de unos punteros para tener en cuenta el proceso físico que simula.

Para simular el proceso de reconfiguración es necesario tomar el enlace que se quiere cerrar, identificar la rama adyacente que se debe abrir y ajustar los valores de los punteros afectados.

Para mover el enlace hacia la derecha en la red de la Figura 7.2, se debe cerrar el enlace 15 y abrir la rama 13. Con esta permutación unitaria se trasladan los nudos de carga *alfa7* y *alfa12* desde el alimentador 2 hasta el alimentador 1 y se está pasando de la red de la Figura 7.2 a la red de la Figura 7.4.

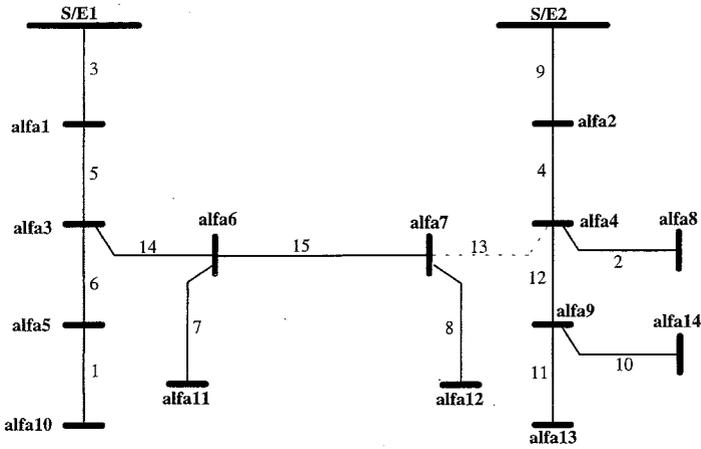


Figura 7.4. Red *Contra* reconfigurada.

Orden	Tipo	Nomenv	Nomrec	Inpnc	Inonc	Nuant
1	TR	alfa5	alfa10	0	0	6
2	TR	alfa4	alfa8	0	12	4
3	TR	S/E1	alfa1	5	0	0
4	TR	alfa2	alfa4	2	0	9
5	TR	alfa1	alfa3	6	0	3
6	TR	alfa3	alfa5	1	14	5
7	TR	alfa6	alfa11	0	0	14
8	TR	alfa7	alfa12	0	0	15
9	TR	S/E2	alfa2	4	0	0
10	TR	alfa9	alfa14	0	11	12
11	TR	alfa9	alfa13	0	0	12
12	TR	alfa4	alfa9	10	0	4
13	EN	alfa4	alfa7	0	0	0
14	TR	alfa3	alfa6	15	0	5
15	TR	alfa6	alfa7	8	7	14

Tabla 7.4. Punteros para la red de la Figura 7.4

El proceso, ilustrado con el caso ejemplo, se puede establecer así:

- Se identifica el enlace: 15.
- Se identifican los elementos adyacentes al enlace.
  - ◆ Por el lado de envío: *NUEN*: 14.
  - ◆ Por el lado de recepción: *NURE*: 13.

- Se identifica como nudo padre de enlace el elemento conectado al nudo del envío:  

$$NUANT_{15}=NUEN=14.$$
- Se almacena el enlace como primer elemento conectado a su nudo padre (*INPNC*) y aquél, desplazado, se almacena como otro conectado al mismo nudo padre (*INONC* o hermano):
  - ◆  $INONC_{15}=INPNC_{NUEN}=INPNC_{14}=7.$
  - ◆  $INPNC_{NUEN}=INPNC_{14}=15.$
- Se almacena el valor del primer elemento conectado a la rama que se abre (*NURE*) como primer elemento conectado al enlace:  $INPNC_{15}=INPNC_{NURE}=8.$ 
  - ◆ Se cambia el valor del nudo padre (*NUANT*) a todos los elementos conectados al nudo que se abre. En el caso ejemplo sólo hay uno :  

$$NUANT_8=15$$
- Si se identifica a *NURE* como nudo hermano de algún otro nudo ( $INONC_{12}=NURE_{13}$ ), esa anotación se reasigna:  $INONC_{12}=INONC_{13}=0.$

Al realizar los cambios indicados la Figura 7.1 se transforma en la Figura 7.2. Los punteros después del cambio se dan en la Tabla 7.4, con los cambiados mostrados en negrita.

Cuando se produce una permutación unitaria siempre se estarán afectando, únicamente dos alimentadores. El número de elementos conectados (como se puede observar en las figuras), se mantiene igual. Este es un punto importante en el proceso pues corresponde a uno de los criterios utilizados para asegurar que la configuración obtenida es factible.

---

## Utilización

---

### Generalidades.

El método empleado en la tesis proporciona un excelente medio para determinar la explotación óptima de una red de distribución.

---

Los criterios utilizados han resultado ser muy eficaces en la consecución del óptimo. Un buen punto de partida, sin embargo, disminuye el tiempo empleado en conseguir la solución.

La definición de un espacio de búsqueda adecuado (ancho del árbol y número máximo de empeoramientos), además permite la consecución en la realidad del óptimo global. Sin embargo, teóricamente esto no es posible asegurarlo y por enumeración exhaustiva sólo es posible comprobarlo para redes pequeñas, pues en las redes grandes la cantidad de opciones a evaluar es inmensa.

El procedimiento utilizado para la reconfiguración, como se dijo anteriormente, sólo analiza un número limitado de configuraciones. Los criterios de truncamiento permiten recortar el espacio de búsqueda y pretenden evitar en lo posible que el óptimo no se alcance. En la Figura 7.5 se muestra el árbol de búsqueda obtenido para el caso Au1000 con un ancho de búsqueda 0, en la Figura 7.6 se muestra el árbol obtenido para la misma red con un ancho 1 y en la Figura 7.5 con un ancho 2.

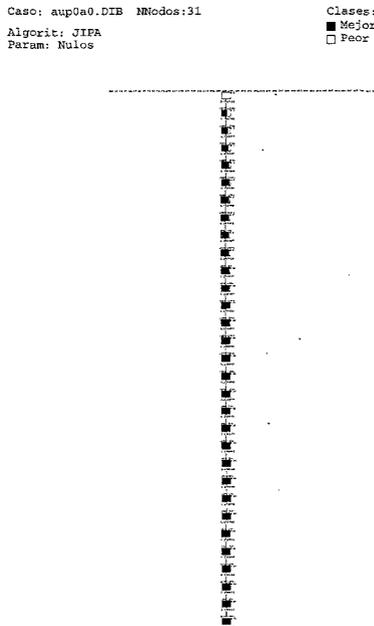


Figura 7.5. Árbol de búsqueda para la red Au1000 cuando se le permite un ancho 0.

Caso: aup0a1.DIB NNodos:465  
 Algorit: JIPA  
 Param: Nulos

Clases:  
 ■ Mejor  
 □ Peor

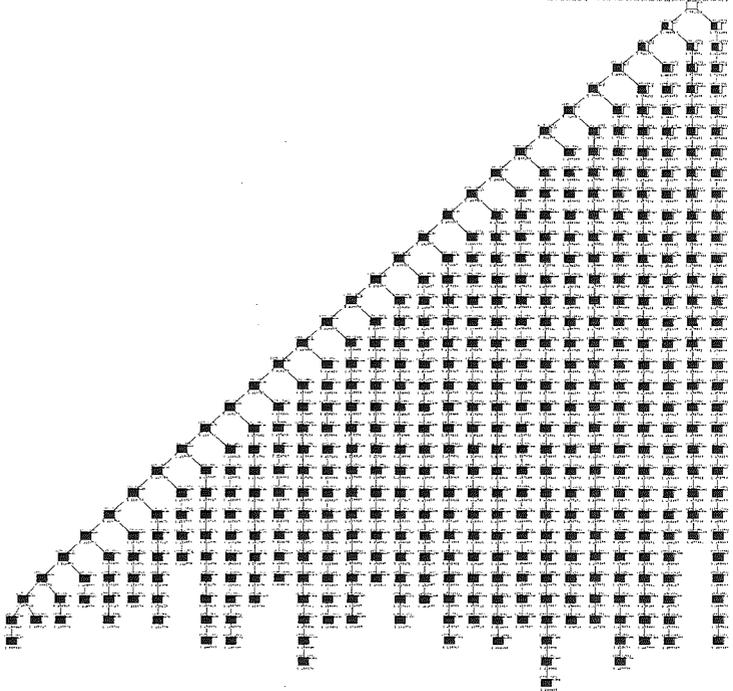


Figura 7.6. Árbol de búsqueda para la red Au1000 cuando se le permite un ancho 1.

Caso: aup0a2.DIB NNodos:4599  
 Algorit: JIPA  
 Param: Nulos

Clases:  
 ■ Mejor  
 □ Peor



Figura 7.7. Árbol de búsqueda para la red Au1000 cuando se le permite un ancho 2.

La búsqueda se organiza siguiendo un esquema de árbol definido por la anchura y la profundidad. Estas propiedades se pueden utilizar como coordenadas cartesianas que parten de unos niveles de profundidad y de anchura cero, correspondientes a la solución inicial leída. Por ejemplo, en la Figura 7.9 los nodos 8 y 13 tienen profundidad 2 y anchura 1, mientras que los nodos 20, 28 35 y 42 tienen profundidad 3 y anchura 3.

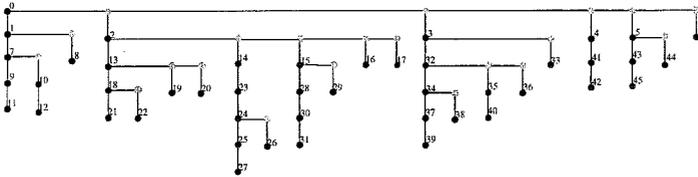


Figura 7.8. Árbol de búsqueda seguido en la obtención del óptimo para la red Augul.

El usuario puede acotar los niveles de anchura y profundidad de tal manera que en cada ejecución del modelo sólo se explore una parte del espacio total. La anchura se acota por medio del ancho máximo permitido y la profundidad por medio del número máximo de empeoramientos permitido.

En la Figura 7.9 se muestra el árbol de búsqueda seguido para buscar la configuración óptima de la red *Civanl*. Este árbol se dibujó concentrando todos los nudos no evaluados correspondientes a la misma configuración (que se diferencian sólo en la cantidad de lazos congelados) en uno sólo. Además el óptimo se dibuja con un bloque negro, y la peor configuración con un bloque blanco. La sección negra en los otros puntos da una medida de la cercanía al óptimo.

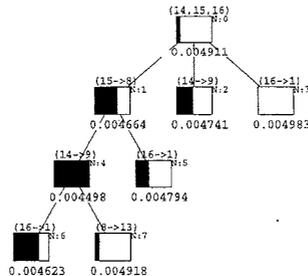


Figura 7.9. Árbol de búsqueda seguido para el caso *Civanl*.

## Estrategia

El algoritmo se puede utilizar en dos formas, simple, esto es, se graban los datos de entrada y se ejecuta el proceso, tomando los resultados obtenidos; o por fases, esto es, se ejecuta el proceso en varias ocasiones incrementando la anchura, tomando como configuración de partida la solución obtenida en la fase anterior.

Una utilización del algoritmo en forma simple, permite por defecto, una búsqueda con ancho dos y con un empeoramiento permitido (si se define en el fichero de entrada otro valor tomará éste). La máxima anchura teórica que el algoritmo puede desarrollar es igual al número de lazos menos uno.

Para tomarle confianza al algoritmo y consolidar una estrategia de utilización, el usuario puede utilizarlo por fases, así:

- Una de acercamiento, ejecutada con anchura cero (sólo se busca en profundidad) y con varios empeoramientos permitidos. Esta fase se puede ejecutar varias veces, tomando siempre para la siguiente la solución de la fase anterior.
- Otra de búsqueda, ejecutada sucesivamente con anchura 1, 2, ... hasta que se tenga certeza de haber encontrado la solución óptima. En esta fase se pretende lograr el óptimo (o más bien, la máxima seguridad de tener el óptimo) y se puede efectuar varias veces tomando siempre como punto inicial la solución de la fase anterior.
- La última de verificación, ejecutada en forma simple o siguiendo las fases descritas, pero desde un punto inicial muy diferente para determinar si la solución obtenida es la óptima.

En la mayoría de las redes ejemplo el óptimo se logró con una anchura cero y sin necesidad de permitir empeoramientos. Dos redes se salieron de esta característica: la red *Glamoc*, para la cual fue necesario permitirle un empeoramiento y la red *Au1000* que, por ser altamente mallada, requirió una anchura de 2.

Al permitir como máximo una anchura de 2 y un empeoramiento, la solución óptima de todas las redes procesadas mostró independencia de la configuración inicial. Al disminuir dichos valores no mostró, normalmente, dependencia del punto inicial, excepto para algunas configuraciones específicas.

---

Para la red *Augugl*, la solución obtenida partiendo de puntos completamente diferentes fue la misma: (10,12,14,32,43,45,47). El peor punto de partida utilizado se logró maximizando la función objetivo en vez de minimizarla.

El árbol de búsqueda, concentrando los nodos no evaluados que corresponden a la misma configuración en uno solo, se muestra en la Figura 7.10 para la configuración inicial (14,42,43,44,45,46,47) y corresponde al árbol abierto mostrado en el capítulo 5. Para este caso la reducción de pérdidas fue de 14,51 % (de 0,135882 a 0,116172 puMW) evaluando 46 nodos.

El óptimo se obtuvo para una anchura de cero y una profundidad de 4 en el árbol de búsqueda.

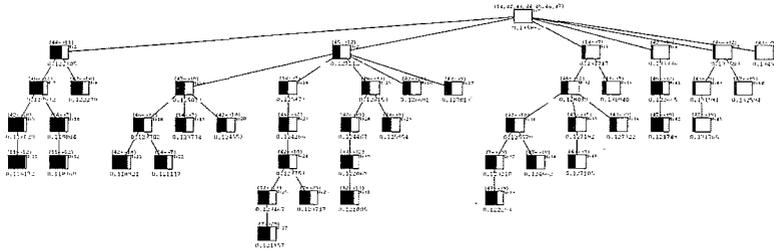


Figura 7.10. Árbol de búsqueda seguido para el caso *Augugl*.

En la Figura 7.11 se puede observar el árbol de búsqueda seguido para la misma red, cuando se parte de la configuración (16,25,42,43,44,45,46) y se le permiten 3 empeoramientos. Para este caso la reducción de pérdidas fue de 69,91 % (de 0,382295 a 0,116172 puMW) evaluando 188 nodos. El óptimo se obtuvo para una anchura de cero y una profundidad de 6.

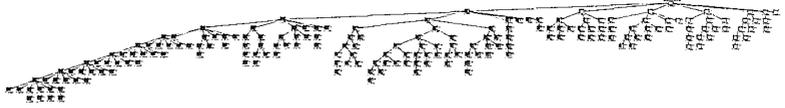


Figura 7.11. Árbol de búsqueda seguido para el caso *Augugl* con una mala configuración inicial.

La entrada de datos es, normalmente, un proceso bastante incómodo, de la misma manera que la obtención de una configuración factible de partida. Cuando el número de elementos es grande, para obtener el punto de partida es necesario realizar un esfuerzo muy grande.

El proceso de obtención de la configuración inicial se realizó ayudándose de una subrutina que al ir conectando los elementos los elimina, de manera que los elementos presentes en el fichero de salida son los que se quedan aislados. Esto permite la revisión de sus conexiones y la corrección en el fichero de entrada.

Se considera, sin embargo, que el proceso se puede sistematizar más al utilizar el mismo proceso seguido para la generación de los elementos de los alimentadores, pero en este caso con toda la red. Además, se considera importante incluir, la identificación de los elementos desconectados y la propuesta de sugerencias de localización.

La implantación informática se realizó en un programa de ordenador realizado en 1500 líneas de lenguaje Fortran. El tiempo de ejecución para los casos tratados se muestra en la Tabla 7.5.

Nombre	Tiempo de ejecución
Baldik	0,08''
Dureza	0,13''
Glamoc	0,13''
Prueba	0,13''
Contra	0,13''
Conbas	0,13''
Civanl	0,13''
BaraWu	0,64''
Augugl	0,53''
Au1000	12'20,15''
Ejreal	8'32''

Tabla 7.5. Tiempos de ejecución para los casos tratados cuando se permite un ancho 2. El equipo utilizado es un PC compatible 486 de 66 Mhz, con 8 Mb de memoria.

---

## Casos de aplicación

---

El algoritmo se utilizó para comprobar la validez de distintos esquemas regulatorios de la distribución. Aquí se ha verificado la solidez del método, pues ha mostrado una gran capacidad de adaptación a diversas condiciones prácticas. Aquí se describen sólo tres por su relación con esquemas regulación específicos.

El primer caso tratado se tomó inicialmente para validar el método y consiste en tomar como función objetivo la clásica función de pérdidas. Este caso puede ser válido para un esquema regulatorio tradicional, en donde no se diferencian los costes de adquisición de energía en los diferentes puntos, ni los costes de venta a los diferentes abonados.

La función de evaluación utilizada (en éste y en los demás casos) se basó en el flujo de cargas radial aproximado y con ella se logra reconfigurar la red muy eficientemente, tanto por la rapidez como por la precisión logradas. El error se mantuvo inferior al 1 % para todas las configuraciones evaluadas; sin embargo, su efecto relativo aparece disminuido pues se aplica a la comparación de alternativas con similar precisión.

La solución obtenida para la red *Augugl* se reproduce en la Figura 7.12.

---

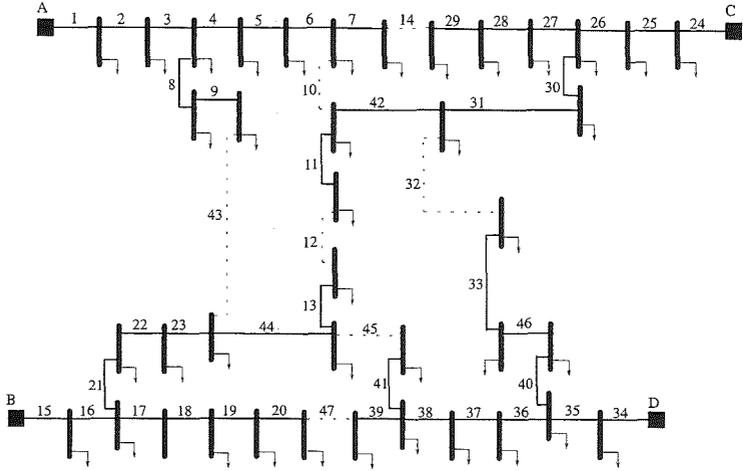


Figura 7.12. Configuración óptima para la red Augugl.

El segundo caso considerado correspondió a la minimización de los costes de compra mayorista. Como primera medida se tomaron iguales los precios de compra en todas las subestaciones de alimentación a 1 pu para compararlos con la solución obtenida para la minimización de pérdidas obteniéndose, por supuesto, la misma solución.

El caso *Augugl* se ejecutó con los costes de la subestación C más altos que para las A, B y D en un 1 %, y se obtuvo la solución que se muestra en la Figura 7.13. Como se puede observar, la solución obtenida es diferente de la obtenida al minimizar pérdidas (ver Figura 7.12).

En la operación normal de los sistemas eléctricos se puede reconocer la existencia de precios diferentes en los nudos de conexión. Esto sucede sin importar el tipo de regulación a que estén sometidos. La situación presentada en el ejemplo es relativamente común y muestra que la minimización de pérdidas como criterio de operación normal ha de ser reconsiderada, especialmente en sistemas con precios mayoristas de electricidad con discriminación nodal. En el capítulo 3 se demostró que a la empresa de distribución-red se le debe exigir operar la red en esta forma, para así promover el bienestar global.

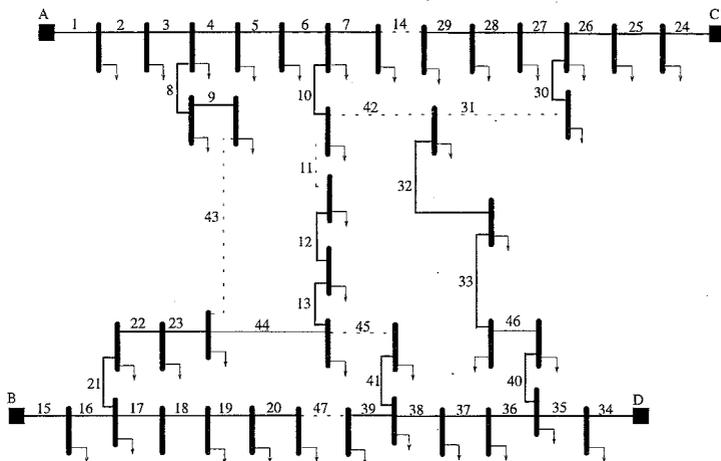


Figura 7.13. Configuración obtenida para la red *Augugl* cuando se tiene diferente coste en las subestaciones de suministro.

El tercer caso especial considerado, correspondió a la maximización de los ingresos netos de la empresa de distribución-red. Esto correspondería a un contexto regulatorio donde se remunerase la red mediante la aplicación de precios puntuales de compra y de venta. Sin embargo es muy importante recalcar que, por tener la empresa distribución-red poder de mercado, **esto no se debería permitir**.

Aquí, no obstante, se realizó la simulación y se obtuvo la configuración de la Figura 7.14. Como se suponía, la empresa de red realiza una explotación errónea (bajo el punto de vista social global) orientada a conseguir un incremento de las tarifas cobradas a los consumidores y, por tanto, obtener más altos ingresos.

No sobra repetir la importancia de simular adecuadamente las condiciones de explotación, para prevenir la existencia de incentivos perversos en la regulación.

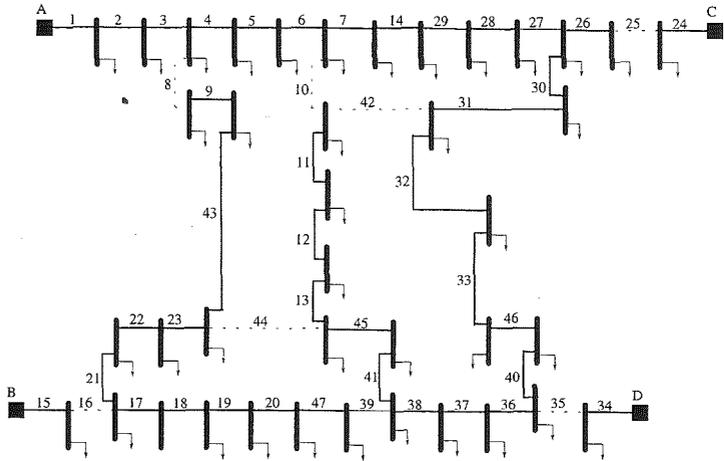


Figura 7.14. Solución obtenida para la red *Augugl* cuando se maximizan los beneficios netos de la empresa de distribución-red.

Otros casos se consideraron en el proceso de optimización para observar el comportamiento ante diversos esquemas regulatorios y la respuesta de los usuarios cuando tienen diferentes grados de elasticidad al precio. Los precios utilizados para la potencia reactiva se calcularon de acuerdo con las ecuaciones planteadas en el capítulo 6.

Se consideraron las siguientes funciones objetivo en el algoritmo de optimización:

- Costes globales de los consumidores.
- Ingresos de la empresa de red al cobrarle y pagarle tarifas fijas.
- Ingresos de la empresa de red al cobrarle tarifas nodales diferentes y pagarle tarifas fijas.
- Ingresos de la empresa de red al cobrarle tarifas puntuales y pagarle tarifas fijas.
- Ingresos de la empresa de red al cobrarle tarifas puntuales y pagarle tarifas puntuales con la carga insensible a los precios.
- Ingresos de la empresa de red al cobrarle tarifas puntuales y pagarle tarifas puntuales con la carga sensible a los precios.

Se pueden plantear, también, nuevas funciones objetivo de acuerdo con el interés del usuario. Sin embargo, las descritas anteriormente corresponden a las más importantes.

La demanda, por otra parte, se modela por las potencias activa y reactiva requeridas a la red. Estas potencias dependen, en general, de la tensión y del precio. En el modelo utilizado en la tesis, no se consideró la dependencia que la carga tiene de la tensión, con el fin de analizar ampliamente la reacción del consumo con el precio. Esta dependencia se puede incluir en el modelo sin mayor dificultad, en caso de necesidad.

La reacción del consumo con el precio se consideró de tres formas:

- Independiente.
- Dependencia dada por una función de utilidad analítica como la tomada por [Murphy-93].
- Dependencia dada por una función de utilidad tomada lineal a trozos, como se muestra en la Figura 7.15. La característica utilizada sin embargo es la función de utilidad marginal por escalones mostrada en la figura.

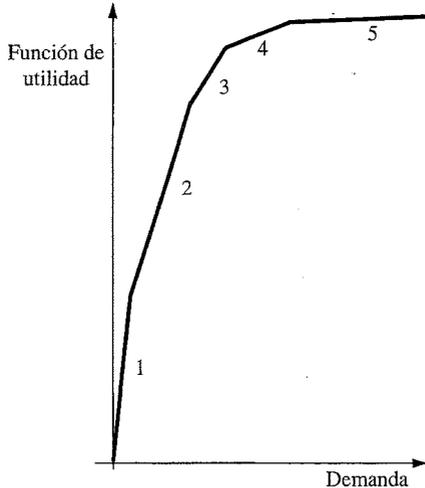


Figura 7.15. Función de utilidad tomada para representar el comportamiento del consumidor.

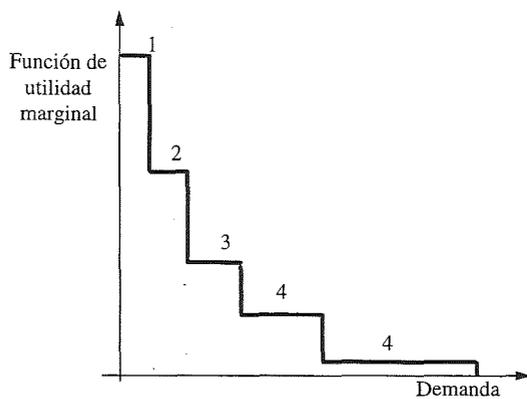


Figura 7.16. Función de utilidad marginal para representar el comportamiento del consumidor en el algoritmo.



---

# **Capítulo 8**

## **CONCLUSIONES**

---



---

## Introducción

---

Los sistemas de distribución se están estudiando ampliamente, con el fin de lograr unas mejores características en su explotación y planificación. Por otra parte, se está dando en todo el mundo un creciente proceso de implantación de la filosofía de libre mercado de energía. Estos dos temas de gran actualidad los integra la presente tesis en una propuesta de explotación de la distribución, aplicable en diversos esquemas regulatorios.

Los dos grandes temas estudiados aquí, están condensados en:

- Obtención de un esquema regulatorio para la red de distribución.
- Explotación óptima de la red de distribución.

Con respecto al segundo tema, en la tesis se propone un método para abordarlo en el amplio contexto regulatorio considerado en el primer tema, incluyendo sus elementos típicos de decisión, como son: la configuración de los alimentadores, los bancos de condensadores, las tomas de los transformadores y la carga. Se ha diseñado un algoritmo novedoso de reconfiguración; para comprobar su validez se ha aplicado a la reconfiguración óptima de diversas redes de distribución.

El primer tema se cumplió al desarrollarse un esquema regulatorio de aplicabilidad general para la distribución-red, de forma que fuese compatible con los conceptos de libre mercado y que evitara la presencia de incentivos perversos en contextos de mayor libertad de actuación por los agentes del mercado.

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas en la tesis, se resumen las contribuciones que se han realizado durante su desarrollo y se proponen algunas líneas de continuación.

---

---

## **Conclusiones de la tesis**

---

### **Globales**

Algunos temas relativos a la explotación óptima de los sistemas de distribución se estudiaron anteriormente y se propusieron también diversas soluciones parciales. No se conoce sin embargo, un estudio anterior que formule y resuelva globalmente el problema de optimizar la explotación de la distribución.

En esta tesis se planteó un enfoque global que permite a una empresa distribuidora tomar las decisiones de explotación, tanto electrotécnicas como de control directo e indirecto de la carga, y su reacción a los precios de la energía.

En este sentido, se planteó la extensión de la filosofía básica tradicional de explotación óptima de un sistema de generación y transporte, al ámbito de la red de distribución. Se presentó, para ello, un método para realizar la optimización de las redes de distribución en forma global por fases. Esta lógica tiene la cualidad fundamental de permitir su aplicabilidad a cualquier función objetivo y de no requerir equipos de cálculo especiales para su proceso.

La inclusión de los criterios de libre mercado en los sistemas eléctricos conduce a la división de las funciones de distribución en dos partes: una, que se encarga de la red y otra, que se encarga de las facetas comerciales. En la tesis se respeta esta división.

En este contexto, en la tesis se considera que la distribución-comercialización debe estar sometida a las leyes del libre mercado y se dedujeron, por tanto, sólo las condiciones que se han de fijar a la empresa de distribución-red para su explotación y, adicionalmente señales óptimas de precios para el consumidor con criterios marginalistas, a partir de las cuales habrían de desarrollarse las tarifas para consumidores regulados. La aplicación de estos criterios hace que estos dos entes actúen en el sentido de maximizar el beneficio social neto.

---

## Específicas

### a) Algoritmo de reconfiguración de la red.

El algoritmo de reconfiguración óptima de los alimentadores de distribución desarrollado en la tesis ha permitido mejorar el estado actual del arte en este campo, donde los enfoques se han concentrado en dos tipos de métodos: los electro-técnicos y los naturales.

Los métodos electro-técnicos, a saber: construcción, destrucción y permutación, se basan en las características de la red para proponer la forma como ésta debe configurarse. Estos métodos han permitido mejorar considerablemente la forma de explotación del sistema, pero no presentan alternativas que les evite caer en óptimos locales.

Los métodos naturales, por su parte, utilizan una filosofía de búsqueda del óptimo global y tienen, por tanto, mecanismos para evadir, en lo posible los óptimos locales. Por ello se considera que son unos métodos bastante sólidos, y aplicables a una diversidad inmensa de casos. Sin embargo, el tiempo de cálculo empleado y los recursos informáticos que requieren son considerables.

Los algoritmos genéticos son muy eficientes en la búsqueda del óptimo, pero debido al alto porcentaje de infactibilidades que se pueden presentar en la red, es preciso definir cuidadosamente el cromosoma tomado como base de trabajo, lo que aún no ha sido satisfactoriamente resuelto (con el fin de guiar la búsqueda por terreno altamente factible, en la tesis se propuso un cromosoma relacionado con el estado definido aquí con base en los lazos de la red).

El método de reconfiguración propuesto de la tesis, sin embargo, aplica la enumeración truncada de alternativas y aprovecha las características de la red de distribución. Por ello, en las redes analizadas se obtuvo el óptimo global cubriendo un espacio restringido de búsqueda y en un tiempo muy reducido.

---

### b) Regulación óptima de la red de distribución

La función objetivo tomada típicamente en literatura revisada en la optimización de la explotación de la red de distribución ha sido las pérdidas de potencia activa. El planteamiento de la tesis ha sido más amplio para poder simular la aplicación en esquemas regulatorios diversos, aunque la tesis propone, como resultado del análisis regulatorio realizado, que a la empresa de distribución-red se la regule en toda circunstancia a minimizar los costes de compra mayorista al realizar la explotación de la red (esta norma se particulariza a la minimización de pérdidas cuando existe un precio uniforme en los nudos de alta tensión).

Este punto es muy importante en sistemas desregulados, donde hay que evitar que a una empresa con poder de mercado se le permita (o se le incentive a) realizar una operación inadecuada de la red para aumentar sus ingresos.

Esta función objetivo es válida también para sistemas regulados en forma tradicional pues, aún en este contexto, se puede reconocer la existencia de diferentes precios de adquisición de la energía en los nudos de suministro. Se ha observado en los casos analizados que la minimización de pérdidas no lleva, normalmente, a realizar la explotación de la red a costes mínimos.

### c) Implantación electrotécnica

La función objetivo utilizada en los casos estudiados en literatura se obtiene generalmente de alguna de estas dos formas:

- Por estimación: con base en fórmulas se estiman las pérdidas globales.
- Por evaluación: con base en el flujo de cargas.

Aquí se utiliza el flujo de cargas radial por el método de Gauss-Seidel topológicamente orientado pues es eficiente, sólido y preciso. Además, en el desarrollo de la tesis se implantó en forma estructurada y eficiente, de manera que se puede utilizar para aplicaciones más avanzadas que la simple evaluación del estado de la red radial.

Por otra parte, para el cálculo de los precios puntuales en alimentadores de distribución se ha seguido el método propuesto por [Murphy-93] con base a: una

---

función analítica que representa el comportamiento del consumidor y una evaluación iterativa de los flujos de potencia y de las potencias consumidas.

Estos dos puntos llevados a la filosofía de la tesis, permitieron desarrollar un flujo de cargas radial que permite calcular tanto las variables electrotécnicas normales como los precios puntuales de las potencias activa y reactiva. Allí no se requiere que las potencias de las cargas sean independientes de la tensión o del precio, sino que se pueden modelar según se requiera.

En la implantación de la reconfiguración óptima, la función objetivo se calcula en la misma forma descrita para el flujo de carga radial, pero se realiza en forma aproximada para acelerar el proceso de cálculo. En este proceso, la evaluación de la función ha permitido acelerar grandemente el proceso dando valores suficientemente correctos.

Estas características motivaron la implantación de diferentes funciones objetivo para representar diversas formas de regulación de la distribución, diferentes tipos de elasticidad de la carga a los precios y de tarifas cobradas a los consumidores.

Con estas características la función objetivo implantada en la reconfiguración óptima permitió evaluar diferentes tipos de regulación y verificar la forma de regulación propuesta.

En la tesis se plantea toda una mecánica de interacción entre la red con sus características económicas y electrotécnicas, y el consumidor con sus intereses económicos y de servicio electrotécnico.

#### d) Implantación informática

La tesis sería incompleta, no obstante, sin una implantación informática que permitiera comprobar la validez del algoritmo. A este respecto se utilizaron las características topológicas de la red de distribución para hacer más eficiente la implantación, pero que bien pueden ser utilizadas en cualquier otro desarrollo.

La función de evaluación, por ejemplo, sólo requiere de un vector de conectividad con el mismo número de elementos que el alimentador. Esto permite recorrerlo, cuando se están realizando los cálculos iterativos, desde la subestación hasta la carga y

---

viceversa, muy rápidamente acelerando, a su vez, el proceso global ya que esta rutina es la base de todos los cálculos realizados.

La identificación adecuada de los alimentadores, a su vez, permite realizar los cálculos ante cualquier cambio unitario de configuración con sólo los dos alimentadores afectados.

Por el contrario, cuando se utilizan los algoritmos genéticos, por ser un método genérico que no se ciñe a las características de la red, el cálculo se debe hacer cada vez para toda la red.

---

## Contribuciones de la tesis

---

### Métodológicas

a) Planteamiento, formulación y algoritmos para la optimización de la operación de la red de distribución

La tesis presenta un método que permite realizar la optimización de las redes de distribución en forma global por fases; con una lógica aplicable en cualquier esquema regulatorio, y adaptable a la capacidad del equipo de cálculo empleado.

Como una parte de este enfoque global, se ha desarrollado un procedimiento para la obtención de la reconfiguración óptima de una red de distribución mediante un algoritmo de enumeración truncada. Éste, utilizado en otros contextos muy diferentes, tiene dos características fundamentales:

- Realiza una búsqueda global en árbol, organizada en dos direcciones:
    - ◆ Profundidad, seleccionando la mejor configuración observada y tomándola como base de la siguiente búsqueda local. Esta dirección tiene el objetivo de seguir la vía que parece más rápida hacia el óptimo.
    - ◆ Anchura, tomando la decisión contraria, para luego seguir la búsqueda en profundidad. Esta dirección tiene el objetivo de evitar los óptimos locales
-

al mirar otras opciones que no parecen preferibles a las ya obtenidas pero que pueden mejorar más adelante.

- Realiza una búsqueda local, ceñida a las características del problema.

El método es muy eficiente en la búsqueda del óptimo, y aunque teóricamente no lo asegura, permite obtener soluciones muy buenas en tiempos cortos y en la práctica no existe evidencia de que no haya encontrado eficientemente el óptimo global en todos los casos estudiados.

La aplicación de este algoritmo a la reconfiguración óptima, ha permitido mejorar los métodos actualmente utilizados en cuanto a la calidad de la solución y al tiempo de cálculo. La implantación y adaptación del algoritmo genérico a este problema ha sido una tarea compleja; conceptualmente se llevó a cabo con algunas características especiales:

- En la búsqueda global: se tomó como variable de decisión congelada en los desplazamientos en profundidad la rama acabada de cerrar. Esto permite un mayor desarrollo del árbol en ese sentido y facilita limitar el ancho de la búsqueda sin perder el óptimo.
- En la búsqueda local: la reconfiguración se realizó intercambiando un enlace y una rama del mismo lazo. La determinación de la rama a tomar se hizo con base en los alimentadores relacionados con el cambio. De esta manera se facilitó el control de factibilidad al:
  - ◆ impedir el intento de abrir una rama si ésta fuera ya un enlace y
  - ◆ controlar el número total de elementos en los dos alimentadores.

El algoritmo evita caer en óptimos locales al seguir dos estrategias: permitir desplazamientos en anchura, esto es, evaluar también configuraciones que no son las mejores, y permitir desplazamientos en profundidad aunque la función objetivo no mejore.

La función de evaluación utilizada para determinar la calidad de las configuraciones tomó como base el flujo de cargas radial, se complementó con la evaluación de los precios puntuales en los nodos, y se le incluyeron modelos de carga sensibles al precio.

---

El resultado fue un método eficiente y versátil de representar la regulación adoptada y la respuesta de los usuarios a las tarifas fijadas.

#### b) Desarrollo de un marco regulatorio para la red de distribución

Un trabajo trascendental realizado en la tesis es el desarrollo de un esquema regulatorio que motive a la empresa de distribución y a sus consumidores a buscar el beneficio social global.

Para la empresa se obtuvieron las condiciones de optimalidad para la inversión en instalaciones de red, y se demostró que para que la empresa cumpla el objetivo planteado de buscar el beneficio global en la operación de la red, se la debe regular para que minimice los costes de suministro en alta tensión.

Para el consumidor se obtuvieron las condiciones de optimalidad para la inversión en instalaciones de consumo, y se determinaron las señales económicas óptimas que se le deben fijar para que cuando está buscando su propio beneficio contribuya al beneficio global.

Adicionalmente, en la tesis se plantearon las posibilidades de aplicación del marco regulatorio en sistemas con diferentes tipos de consumidores, todos sometidos a tarifas marginalistas, todos sometidos a tarifas fijas, o sometidos unos a tarifas marginalistas y otros a tarifas fijas.

La amplitud del planteamiento realizado permitiría la aplicación del algoritmo de reconfiguración a usos colaterales tales como:

- Mejoramiento de las políticas de explotación.
  - Fijación de políticas de gestión de carga.
  - Análisis de tarificación de la distribución.
  - Explotación de la red más cerca de sus límites, retardando inversiones.
  - Detección de zonas de deficiente diseño observando ya sea las saturaciones de capacidad de la red o los grandes incrementos en los precios puntuales.
-

- Necesidades de ampliación de capacidad o posibilidades de reconfiguración para alimentar adecuadamente la carga.
- Necesidades de inversión para evitar condiciones forzadas de explotación.
- Generación de precios puntuales, sirviendo como base para comparar cuantitativamente distintas redes de distribución, con el objeto de establecer compensaciones económicas, tarifas diferenciadas, etc.

### **Específicas de implantación**

En el desarrollo de la tesis se estudiaron ampliamente los aspectos topológicos para explotar las características de las redes de distribución en la implantación realizada.

Se programó un flujo de cargas radial por el método de Gauss-Seidel topológicamente orientado. En éste se incluye, por primera vez, el cálculo de los precios puntuales en las redes de distribución.

Se programó una reconfiguración óptima de los alimentadores de distribución que utiliza el algoritmo de enumeración truncada, recalculando sólo los alimentadores afectados y estructurada de tal forma que se pueda cambiar fácilmente de función objetivo dependiendo de los requerimientos del análisis deseado.

En el desarrollo de la Tesis, para mejorar los requerimientos informáticos, se definieron unos punteros que permiten acceder a los datos sin necesidad de cambiar toda la estructura computacional. Esto mejoró la eficiencia de los procesos de reconfiguración y cálculo, sin hacer grandes traslados de información o sin realizar evaluaciones innecesarias.

---

## **Recomendaciones para futuros trabajos**

---

Esta tesis abre perspectivas para futuros trabajos sobre explotación óptima de las redes de distribución así como en la aplicación de los principios de libre mercado en el ámbito de la distribución.

Es normal que después de dedicarle tantos esfuerzos a un tema determinado, se desee obtener cada vez mayores logros. Sin embargo, la complejidad de los temas tratados

---

impiden que una persona resuelva todas sus inquietudes en un tiempo de por sí finito. Por ello quedan todavía temas por resolver, temas que permiten, por sí mismos, la continuación de las líneas comenzadas en esta tesis.

La primera recomendación, por supuesto, consiste en continuar en el estudio del método global propuesto con el fin de desarrollar jerárquicamente la optimización del resto de las variables de decisión disponibles, esto es, las tomas de los transformadores, el despacho de los condensadores, y el control directo de la carga.

En vista de la rapidez del algoritmo, se piensa posible su utilización en tiempo real. Por ello se debe analizar detalladamente esta posibilidad, especialmente, la forma de recortar la búsqueda aún más, considerando que el cambio es menor (se pasa de una configuración normal y por tanto relativamente buena a otra similar).

Las redes neuronales, por otra parte, se muestran adecuadas para procesos que se deben realizar en tiempo real. Como el algoritmo desarrollado tiene excelentes características de eficiencia computacional, se recomienda estudiar la posibilidad de utilizarlo para realizar el entrenamiento de estas redes.

La experiencia de la implantación paralelo realizada para el algoritmo de reconfiguración y las características observadas en la utilización de los algoritmos genéticos, permiten proponer la realización de una reconfiguración paralelo de las redes de distribución por algoritmos genéticos. Para ello se recomienda la utilización del cromosoma propuesto en la tesis, directamente relacionado con el vector de estado que se ha empleado.

Es muy importante, por otra parte, continuar el análisis regulatorio para desarrollar las condiciones necesarias para regular adecuadamente los diversos aspectos de la gestión de la demanda tanto desde el punto de vista de la empresa de distribución-red, como desde el punto de vista del usuario.

---

---

**Apéndice 1**  
**DEFINICIONES**  
**TOPOLÓGICAS**

---



Topología es una parte de las matemáticas que traduce información gráfica en relaciones algebraicas sistematizables.

**Gráfica** Es un dibujo del circuito en el que sólo se retienen los **nudos** o vértices (**V**) y los elementos se reemplazan por líneas o **aristas** (**A**). Formalmente una **gráfica**  $G = (V, A)$  es un conjunto finito de vértices y aristas. El orden de la gráfica lo da el número de vértices  $|V|$  mientras su tamaño lo da el número de aristas  $|A|$ . La gráfica se obtiene dibujando los elementos como segmentos rectilíneos y los nudos como puntos.

**Subgráfica** Es cualquier subconjunto de elementos de la gráfica. **H** es una subgráfica de **G** si  $V(H) \subseteq V(G)$  y  $A(H) \subseteq A(G)$ . Si **H** es una subgráfica de **G** y  $V(H) = V(G)$  se dice que **H** es una subgráfica envolvente de **G**.

**Trayectoria** Es una subgráfica con no más de dos aristas conectadas a un nudo. Las trayectorias pueden ser abiertas o cerradas.

**Gráfica conectada** Es una gráfica que contiene por lo menos una trayectoria entre cada par de nudos.

**Gráfica conectada** Es una gráfica cuyos elementos tienen direcciones asignadas que indican su orientación (típicamente se le asigna la dirección de la corriente).

**Árbol** Es una subgráfica conectada que contiene todos los nudos de la gráfica y que no tiene ninguna trayectoria cerrada (subgráfica envolvente sin caminos cerrados). Una gráfica puede tener muchas formas de incluir todos los nudos de la red con distintas aristas, esto es, hay muchos árboles posibles para una red. Las aristas que conforman el árbol toman el nombre de **ramas**, y el número de ramas (**R**) es:

$$R = |V| - 1.$$

$$NMA = \frac{|A|!}{(|V| - 1)! (|A| - |V| + 1)!}$$

**Coárbol** Es una subgráfica (no necesariamente conectada) que incluye todas las aristas de la gráfica que no están en el árbol (es el complemento del árbol). Las aristas que lo conforman toman el nombre de **enlaces**, y el número de enlaces (**E**) es:

$$E = |A| - |V| + 1$$

El número posible de coárboles diferentes de una gráfica es igual al número de árboles.

**Lazo o malla** Es una trayectoria cerrada.

**Malla básica** Es un **lazo** que sólo incluye un **enlace** (al conectar un enlace al árbol se forma un lazo que contiene una serie de ramas que aquí se llamarán **ramas de lazo** y un enlace). La orientación de una malla básica es la misma del enlace que la define, y el número de mallas básicas es igual a **E**.

---

---

**Apéndice 1**  
**DEFINICIONES**  
**TOPOLÓGICAS**

---



Topología es una parte de las matemáticas que traduce información gráfica en relaciones algebraicas sistematizables.

**Gráfica** Es un dibujo del circuito en el que sólo se retienen los **nudos** o vértices (**V**) y los elementos se reemplazan por líneas o **aristas** (**A**). Formalmente una **gráfica**  $G = (V, A)$  es un conjunto finito de vértices y aristas. El orden de la gráfica lo da el número de vértices  $|V|$  mientras su tamaño lo da el número de aristas  $|A|$ . La gráfica se obtiene dibujando los elementos como segmentos rectilíneos y los nudos como puntos.

**Subgráfica** Es cualquier subconjunto de elementos de la gráfica. **H** es una subgráfica de **G** si  $V(H) \subseteq V(G)$  y  $A(H) \subseteq A(G)$ . Si **H** es una subgráfica de **G** y  $V(H) = V(G)$  se dice que **H** es una subgráfica envolvente de **G**.

**Trayectoria** Es una subgráfica con no más de dos aristas conectadas a un nudo. Las trayectorias pueden ser abiertas o cerradas.

**Gráfica conectada** Es una gráfica que contiene por lo menos una trayectoria entre cada par de nudos.

**Gráfica conectada** Es una gráfica cuyos elementos tienen direcciones asignadas que indican su orientación (típicamente se le asigna la dirección de la corriente).

**Árbol** Es una subgráfica conectada que contiene todos los nudos de la gráfica y que no tiene ninguna trayectoria cerrada (subgráfica envolvente sin caminos cerrados). Una gráfica puede tener muchas formas de incluir todos los nudos de la red con distintas aristas, esto es, hay muchos árboles posibles para una red. Las aristas que conforman el árbol toman el nombre de **ramas**, y el número de ramas (**R**) es:

$$R = |V| - 1.$$

$$NMA = \frac{|A|!}{(|V|-1)! (|A|-|V|+1)!}$$

**Coárbol** Es una subgráfica (no necesariamente conectada) que incluye todas las aristas de la gráfica que no están en el árbol (es el complemento del árbol). Las aristas que lo conforman toman el nombre de **enlaces**, y el número de enlaces (**E**) es:

$$E = |A| - |V| + 1$$

El número posible de coárboles diferentes de una gráfica es igual al número de árboles.

**Lazo o malla** Es una trayectoria cerrada.

**Malla básica** Es un **lazo** que sólo incluye un **enlace** (al conectar un enlace al árbol se forma un lazo que contiene una serie de ramas que aquí se llamarán **ramas de lazo** y un enlace). La orientación de una malla básica es la misma del enlace que la define, y el número de mallas básicas es igual a **E**.

---

---

# **Apéndice 2**

## **EJEMPLOS**

---



## Introducción

Para que los resultados obtenidos puedan ser reproducibles, se escriben a continuación los datos de los ejemplos ejecutados.

## Caso 1 Baldick

Este pequeño caso fue propuesto por Baldick en la discusión de la referencia [Glamocanin-90] para probar que el algoritmo no siempre llevaba al óptimo. Con el método descrito en la tesis se logró adecuadamente la misma configuración dada por Baldick.

```

C      DATOS DE UN ALIMENTADOR DE PRUEBA PARA EL FLUJO RADIAL

C      Nombre del caso
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
cTI      aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
TI      Red Aerea Tipo BALDICK
cTI      aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa

C      Valores Base
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C      SBASE      VBASE
C      MVA      kV
cBA      ###.### ###.###
BA      100.0000  23.0000
cBA      ###.### ###.###

C      Datos de tramos
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C      ENVIO      RECEPCION      Impedancia      Potencia      Reactiva      Capac
C      R_tramo      X_tramo      P_Nudo_R      Q_Nudo_R      QC_NUDO_R
C      pu      pu      pu      pu      pu
cTR      aaaaaaaaa      aaaaaaaaa      ###.### ###.### ###.### ###.### ###.### ###.##
cTR      Nudo_EnvIo      NudoRecepc      0000.0000  0000.0000  0000.0000  0000.0000  0000.0000  0001.
TR      alfa1      alfa2      0.1000      0.0000      00.0500      0.0000  000.0000  0001.
TR      alfa2      alfa4      0.1000      0.0000      000.1000  000.1000  0000.0000  0001.
TR      alfa1      alfa3      0.2000      0.0000      0.0000      0.0000  000.1000  0001.
cTR      aaaaaaaaa      aaaaaaaaa      ###.### ###.### ###.### ###.### ###.### ###.###
cEN      aaaaaaaaa      aaaaaaaaa      ###.### ###.### ###.### ###.###
EN      alfa3      alfa4      0.2000      0.0000      1.
cEN      aaaaaaaaa      aaaaaaaaa      ###.### ###.### ###.### ###.###

C      Datos de Subestaciones
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
    
```

```

NOMBRE          TensiOn
                pu
cSE aaaaaaaaaa #####.#### #####.####
cSE Nombre S/E 0000.0000 0000.0000 0001.
SE   alfa1 0001.      0.      1.
cSE aaaaaaaaaa #####.#### #####.####
    
```

## Caso 2 Dureza

El ejemplo presentado se diseñó específicamente para probar le comportamiento de los punteros. Este ejemplo sólo tiene un alimentador y un lazo. El funcionamiento del algoritmo fue muy bueno.

```

C   DATOS DE UN ALIMENTADOR DE PRUEBA PARA EL FLUJO RADIAL

C   Nombre del caso
      1           2           3           4           5           6           7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
cTI  aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
TI   Red Aerea Prueba Dureza
cTI  aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa

C   Valores Base
      1           2           3           4           5           6           7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C   SBASE      VBASE
C   MVA        kv
cBA  #####.#### #####.####
EA   100.0000  23.0000
cBA  #####.#### #####.####

C   Datos de tramos
      1           2           3           4           5           6           7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C   ENVIO      RECEPCION      Impedancia      Potencia      Reactiva
C   R_tramo    X_tramo      P_Nudo_R    Q_Nudo_R    QC_Nudo_R
C   pu         pu         pu         pu         pu
cTR  aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa #####.#### #####.#### #####.#### #####.#### #####.####
cTR  Nudo_EnvIo NudoRecepc 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0001.
TR   alfa4     alfa8      0.0800   0.1100   0.0100   0.0090 0000.0000 0001.
TR   alfa2     alfa4      0.1100   0.1100   0.0400   0.0270 0000.0000 0001.
TR   alfa7     alfa12     0.0800   0.1100   0.0500   0.0300 0.0120 0001.
TR   S/E2     alfa2      0.1100   0.1100   0.0100   0.0090 0000.0000 0001.
TR   alfa9     alfa14     0.1100   0.1100   0.0060   0.0010 0.0060 0001.
TR   alfa9     alfa13     0.1100   0.1100   0.0060   0.0010 0.0060 0001.
TR   alfa4     alfa9      0.0800   0.1100   0.0300   0.0150 0.0110 0001.
TR   alfa4     alfa7      0.0900   0.1800   0.0200   0.0080 0.0120 0001.
cTR  aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa #####.#### #####.#### #####.#### #####.#### #####.####

C   Datos de tramos
      1           2           3           4           5           6           7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
    
```

```

      ENVIO      RECEPCION      Impedancia
                                R_tramo  X_tramo
                                pu      pu
cEN aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa ###.###.###.###
EN  alfa8      alfa9      0.0900  0.1200
cEN aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa ###.###.###.###

C   Datos de Subestaciones
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
      NOMBRE      TensiOn
                                pu
cSE aaaaaaaaaa ###.###.###.###
cSE Nombre S/E  0000.0000 0000.0000 0001.
SE   S/E2      1.      0.      1.
cSE aaaaaaaaaa ###.###.###.###
    
```

---

## Caso 3 Glamoc

---

Se tomó este ejemplo de la referencia [Glamocanin-90]. El algoritmo se comportó muy bien.

```

C   DATOS DE UN ALIMENTADOR DE PRUEBA PARA EL FLUJO RADIAL

C   Nombre del caso
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
cTI aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
TI   Red Aerea Tipo Glamocanin
cTI aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa

C   Valores Base
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C   SBASE      VBASE
C   MVA      kV
cBA ###.###.###.###
BA   1.0000  10.0000
cBA ###.###.###.###

C   Datos de tramos
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C   ENVIO      RECEPCION      Impedancia      Potencia      Reactiva
C   R_tramo    X_tramo      P_Nudo_R      Q_Nudo_R      QC_NUGO_R
C   pu        pu        pu        pu        pu
CTR aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa ###.###.###.### ###.###.###.### ###.###.###.### ###.###.###.###
cTR Nudo_Envio NudoRecepc 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0001.
TR   S/E1      alfa2      0.0078  0.0021  0.6000  0.4000 0000.0000 0001.
TR   S/E1      alfa3      0.0078  0.0021  0.5000  0.3000 0000.0000 0001.
TR   S/E1      alfa4      0.0156  0.0042  0.1000  0.0900 0000.0000 0001.
TR   alfa3      alfa5      0.0117  0.0032  0.6000  0.0400 0000.0000 0001.
TR   alfa2      alfa6      0.0117  0.0032  1.3000  1.1000 0000.0000 0001.
TR   alfa3      alfa7      0.0137  0.0037  1.3000  1.0000 0000.0000 0001.
    
```

---

```

TR   alfa4      alfa8      0.0117  0.0032  0.1000  0.0900 0000.0000 0001.
TR   alfa8      alfa9      0.0117  0.0032  0.8000  0.6000 0000.0000 0001.
TR   alfa2      alfa10     0.0117  0.0032  0.3000  0.1000 0000.0000 0001.
cTR  aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa #####.#### #####.#### #####.#### #####.#### #####.####

```

C Datos de enlaces

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
  ENVIO      RECEPCION      Impedancia
                        R_tramo  X_tramo
                        pu        pu
cEN  aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa #####.#### #####.####
EN   alfa2      alfa5      0.0078  0.0021      1.
EN   alfa3      alfa9      0.0078  0.0021      1.
EN   alfa6      alfa9      0.0078  0.0021      1.
EN   alfa4      alfa10     0.0117  0.0032      1.
cEN  aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa #####.#### #####.####

```

C Datos de Subestaciones

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
  NOMBRE      TensiOn
                        pu
cSE  aaaaaaaaaa #####.#### #####.####
cSE  Nombre S/E 0000.0000 0000.0000 0001.
SE   S/E1      1.      0.      1.
cSE  aaaaaaaaaa #####.#### #####.####

```

## Caso 4 Prueba

Este caso se diseñó para comprobar el funcionamiento de los punteros y revisar los flujos de potencia reactiva.

C DATOS DE UN ALIMENTADOR DE PRUEBA PARA EL FLUJO RADIAL

C Nombre del caso

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
cTI  aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
TI   Red Aerea Prueba
cTI  aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa

```

C Valores Base

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C   SBASE      VBASE
C   MVA        kV
cBA  #####.#### #####.####
BA   100.0000  23.0000
cBA  #####.#### #####.####

```

C Datos de tramos

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789

```

```

C      ENVIO      RECEPCION      Impedancia      Potencia      Reactiva
C      R_tramo  X_tramo  P_Nudo_R  Q_Nudo_R  QC_Nudo_R
C      pu      pu      pu      pu      pu
cTR  aaaaaaaaaa  aaaaaaaaaa  ###.###  ###.###  ###.###  ###.###  ###.###
cTR  Nudo_EnvIo  *NudoRecep  0000.0000  0000.0000  0000.0000  0000.0000  0000.0000  0001.
TR   alfa5      alfa10     0.0400    0.0400    0.0150    0.0120    0000.0000  0001.
TR   alfa4      alfa8      0.0800    0.1100    0.0100    0.0090    0000.0000  0001.
TR   S/E1      alfa1     0.0400    0.0400    0.0210    0.0100    0.0180  0001.
TR   alfa2      alfa4     0.1100    0.1100    0.0400    0.0270    0000.0000  0001.
TR   alfa1      alfa3     0.1100    0.1100    0.0400    0.0270    0000.0000  0001.
TR   alfa3      alfa5     0.0800    0.1100    0.0450    0.0200    0.0370  0001.
TR   alfa6      alfa11    0.1100    0.1100    0.0100    0.0090    0000.0000  0001.
TR   alfa7      alfa12    0.0800    0.1100    0.0500    0.0300    0.0120  0001.
TR   S/E2      alfa2     0.1100    0.1100    0.0100    0.0090    0000.0000  0001.
TR   alfa9      alfa14    0.1100    0.1100    0.0060    0.0010    0.0060  0001.
TR   alfa9      alfa13    0.1100    0.1100    0.0060    0.0010    0.0060  0001.
TR   alfa4      alfa9     0.0800    0.1100    0.0300    0.0150    0.0110  0001.
TR   alfa4      alfa7     0.0900    0.1800    0.0200    0.0080    0.0120  0001.
TR   alfa3      alfa6     0.0900    0.1200    0.0100    0.0070    0.0180  0001.
cTR  aaaaaaaaaa  aaaaaaaaaa  ###.###  ###.###  ###.###  ###.###  ###.###

C      Datos de tramos
C      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
      ENVIO      RECEPCION      Impedancia
      R_tramo  X_tramo
      pu      pu
cEN  aaaaaaaaaa  aaaaaaaaaa  ###.###  ###.###  ###.###  ###.###
EN   alfa6      alfa7      0.0400    0.0400
cEN  aaaaaaaaaa  aaaaaaaaaa  ###.###  ###.###  ###.###  ###.###

C      Datos de Subestaciones
C      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
      NOMBRE      Tension
      pu
cSE  aaaaaaaaaa  ###.###  ###.###  ###.###  0001.
cSE  Nombre S/E  0000.0000  0000.0000
SE   S/E1      1.      0.      1.
SE   S/E2      1.      0.      1.
cSE  aaaaaaaaaa  ###.###  ###.###  ###.###  ###.###
    
```

## Caso 5 Contra

El ejemplo se diseñó para comprobar el comportamiento de los punteros ante redes que tubieran muchos elementos aguas abajo, y funcionó adecuadamente. En ella se puede ver al reconfigurar que no es aplicable, generalmente, el criterio planteado por [Liu-91], pues al mover el enlace la función objetivo no se comporta en forma convexa.

```

C      DATOS DE UN ALIMENTADOR DE PRUEBA PARA LA RECONFIGURACION

C      Nombre del caso
C      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
    
```



## Caso 7 Conbas

Se diseñó también como red de prueba.

```

C      DATOS DE UN ALIMENTADOR DE PRUEBA PARA LA RECONFIGURACION

C      Nombre del caso
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
cTI      aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
TI      Red Aerea CONbasejemplo
cTI      aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa

C      Valores Base
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C      SBASE      VBASE
C      MVA      kV
cBA      ####.### ##.###
BA      100.0000  23.0000
cBA      ####.### ##.###

C      Datos de tramos
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C      ENVIO      RECEPCION      Impedancia      Potencia      Reactiva
C      R_tramo      X_tramo      P_Nudo_R      Q_Nudo_R      QC_NUDO_R
C      pu      pu      pu      pu      pu
cTR      aaaaaaaaa      aaaaaaaaa      ###.### ##.### ##.### ##.### ##.###
cTR      Nudo_EnvIo      NudoRecepc      0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000
TR      alfa5      alfa10      0.0400 0.0400 0.0150 0.0120 0000.0000 0001.
TR      alfa4      alfa8      0.0800 0.1100 0.0100 0.0090 0000.0000 0001.
TR      S/E1      alfa1      0.0400 0.0400 0.0210 0.0100 0.0180 0001.
TR      alfa2      alfa4      0.1100 0.1100 0.0400 0.0270 0000.0000 0001.
TR      alfa1      alfa3      0.1100 0.1100 0.0400 0.0270 0000.0000 0001.
TR      alfa3      alfa5      0.0800 0.1100 0.0450 0.0200 0.0370 0001.
TR      alfa6      alfa11      0.1100 0.1100 0.0100 0.1090 0000.0000 0001.
TR      alfa7      alfa12      0.0800 0.1100 0.0500 0.0300 0.1120 0001.
TR      S/E2      alfa2      0.1100 0.1100 0.0100 0.0090 0000.0000 0001.
TR      alfa9      alfa14      0.1100 0.1100 0.0060 0.0010 0.0060 0001.
TR      alfa9      alfa13      0.1100 0.1100 0.0060 0.0010 0.0060 0001.
TR      alfa4      alfa9      0.0800 0.1100 0.0300 0.0150 0.0110 0001.
TR      alfa4      alfa7      0.0900 0.1800 0.0200 0.0080 0.0120 0001.
TR      alfa3      alfa6      0.0900 0.1200 0.0100 0.0070 0.0180 0001.
cTR      aaaaaaaaa      aaaaaaaaa      ###.### ##.### ##.### ##.### ##.### ##.###

C      Datos de tramos
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
      ENVIO      RECEPCION      Impedancia
      R_tramo      X_tramo
      pu      pu
cEN      aaaaaaaaa      aaaaaaaaa      ###.### ##.### ##.###
EN      alfa6      alfa7      0.0400 0.0400
EN      alfa10      alfa14      0.0800 0.1100
    
```

```

cEN aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa ###.### ##.###
C   Datos de Subestaciones
   1         2         3         4         5         6         7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
   NOMBRE           TensiOn
                   pu
cSE aaaaaaaaaa ###.### ##.### 0001.
cSE Nombre S/E 0000.0000 0000.0000
SE   S/E1      1.      0.      1.
SE   S/E2      1.      0.      1.
cSE aaaaaaaaaa ###.### ##.###
    
```

## Caso 8 Civanl

Es una red muy utilizada en las comprobaciones de los diferentes métodos, pero es relativamente pequeña. Sin embargo se obtuvo el óptimo sin mayores problemas.

```

C   DATOS DE UN ALIMENTADOR DE PRUEBA PARA EL FLUJO RADIAL
C   Nombre del caso
   1         2         3         4         5         6         7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
cTI   aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
TI    Red Aerea Tipo
cTI   aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa

C   Valores Base
   1         2         3         4         5         6         7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C     SBASE      VBASE
C     MVA        kv
cBA   ###.### ##.###
BA    100.0000  23.0000
cBA   ###.### ##.###

C   Datos de tramos
   1         2         3         4         5         6         7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C     ENVIO      RECEPCION      Impedancia      Potencia      Reactiva
C     R_tramo   X_tramo   P_Nudo_R   Q_Nudo_R   QC_Nudo_R
C     pu        pu        pu        pu        pu
cTR   aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa ###.### ##.### ##.### ##.### ##.### ##.###
cTR   Nudo_EnvIo NudoRecepc 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000
TR    alfa6      alfa7      0.0400  0.0400  0.0150  0.0120 0000.0000 0001.
TR    alfa13     alfa15     0.0800  0.1100  0.0100  0.0090 0000.0000 0001.
TR    alfa15     alfa16     0.0400  0.0400  0.0210  0.0100  0.0180 0001.
TR   Subestac_2 alfa8      0.1100  0.1100  0.0400  0.0270 0000.0000 0001.
c TR   Subestac_2 alfa17     0.1100  0.1100  0.0400  0.0270 0000.0000
TR    alfa9      alfa12     0.0800  0.1100  0.0450  0.0200  0.0370 0001.
TR   Subestac_3 alfa13     0.1100  0.1100  0.0100  0.0090 0000.0000 0001.
TR    alfa8      alfa9      0.0800  0.1100  0.0500  0.0300  0.0120 0001.
TR    alfa8      alfa10     0.1100  0.1100  0.0100  0.0090 0000.0000 0001.
TR    alfa9      alfa11     0.1100  0.1100  0.0060  0.0010  0.0060 0001.
    
```

```

TR Subestac_1      alfa4      0.0750   0.1000   0.0200   0.0160 0000.0000 0001.
TR      alfa4      alfa5      0.0800   0.1100   0.0300   0.0150   0.0110 0001.
TR      alfa4      alfa6      0.0900   0.1800   0.0200   0.0080   0.0120 0001.
TR      alfa13     alfa14     0.0900   0.1200   0.0100   0.0070   0.0180 0001.
CTR aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa #####.#### #####.#### #####.#### #####.####

```

```

C      Datos de tramos
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
      ENVIO      RECEPCION      Impedancia
                        R_tramo X_tramo
                        pu      pu
cEN aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa #####.#### #####.####
EN      alfa5      alfa11      0.0400   0.0400000
EN      alfa10     alfa14     0.0400   0.0400000
cEN aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa #####.#### #####.####

```

```

C      Datos de Subestaciones
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
      NOMBRE      TensiOn
                        pu
cSE aaaaaaaaaa #####.#### #####.#### 0000.0000
cSE Nombre S/E 0000.0000 0000.0000
SE Subestac_1 1. 0. 0001.0000
SE Subestac_2 1. 0. 00001.0000
SE Subestac_3 1. 0. 00001.0000
cSE aaaaaaaaaa #####.#### #####.####

```

## Caso 9 BaraWu

Esta es una red planteada por [Baran-89], pero también la utilizó [Goswami-93]. El óptimo obtenido fué mejor que el logrado en esas referencias.

```

C      DATOS DE UN ALIMENTADOR DE PRUEBA PARA EL FLUJO RADIAL
C      Nombre del caso
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
cTI aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
TI Red Baran_Wu de 37 elementos
cTI aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
NP
NH 3
C      Valores Base
      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C      SBASE      VBASE      ZBASE
C      MVA      KV      Ohm
cBA #####.#### #####.#### #####.####
BA 10.0000 12.6600 16.0276
cBA #####.#### #####.#### #####.####
C      Datos de tramos

```



## Caso 10 Augugl

Esta es una red tomada de [Augugliaro-91] y tiene la característica de ser muy mallada para ser una red relativamente pequeño. Se ha tomado como una buena base para los ejemplos considerados en la tesis, pues es pequeña pero tiene muchas características de una red grande.

```

C DATOS DE UNA RED DE PRUEBA

C Nombre del caso
1 2 3 4 5 6 7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
cTI aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
TI Red Augugliaro 40 barras 47 elementos (7 enlaces)
cTI aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa

C Valores Base
1 2 3 4 5 6 7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C SBASE VBASE
C MVA kV
cBA ####.#### ##.###
BA 1.0000 20.0000
cBA ####.#### ##.###

C Datos de tramos
1 2 3 4 5 6 7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C ENVIO RECEPCION Impedancia Potencia Reactiva
C R_tramo X_tramo P_Nudo_R Q_Nudo_R QC_Nudo_R
C pu pu pu pu pu
cTR aaaaaaaaa aaaaaaaaa ####.#### ##.### ####.#### ##.### ####.#### ##.###
cTR Nudo_EnvIo NudoRecepc 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000
TR S/E1 alfa01 3.975e-04 4.000e-05 0.4290 0.2100 0000.0000 0001.
TR alfa01 alfa02 5.900e-04 6.000e-05 0.4550 0.2280 0000.0000 0001.
TR alfa02 alfa03 4.625e-04 4.750e-05 0.3070 0.1450 0000.0000 0001.
TR alfa03 alfa04 7.850e-04 8.000e-05 0.5000 0.2360 0000.0000 0001.
TR alfa04 alfa05 5.450e-04 5.500e-05 0.5810 0.2890 0000.0000 0001.
TR alfa05 alfa06 7.625e-04 7.750e-05 0.2340 0.1070 0000.0000 0001.
TR alfa06 alfa07 8.600e-04 8.750e-05 0.4150 0.2170 0000.0000 0001.
TR alfa03 alfa14 5.775e-04 5.750e-05 0.3780 0.1810 0000.0000 0001.
TR alfa14 alfa20 5.550e-04 5.500e-05 0.4840 0.2380 0000.0000 0001.
TR alfa06 alfa15 8.175e-04 8.250e-05 0.3540 0.1630 0000.0000 0001.
TR alfa15 alfa19 6.250e-04 6.250e-05 0.4450 0.2030 0000.0000 0001.
TR alfa19 alfa22 4.650e-04 4.750e-05 0.4630 0.2440 0000.0000 0001.
TR alfa22 alfa25 3.550e-04 3.500e-05 0.2750 0.1290 0000.0000 0001.
EN alfa07 alfa08 4.750e-04 4.750e-05 0.0000 0000.0000 0001.
TR S/E2 alfa29 7.175e-04 7.250e-05 0.5530 0.2780 0000.0000 0001.
TR alfa29 alfa30 8.225e-04 8.250e-05 0.2150 0.1040 0000.0000 0001.
TR alfa30 alfa31 5.450e-04 5.500e-05 0.3210 0.1520 0000.0000 0001.
TR alfa31 alfa32 4.625e-04 4.750e-05 0.2060 0.0970 0000.0000 0001.
TR alfa32 alfa33 4.800e-04 4.750e-05 0.2090 0.1030 0000.0000 0001.
TR alfa33 alfa34 6.475e-04 6.500e-05 0.5120 0.2320 0000.0000 0001.
TR alfa30 alfa27 7.325e-04 7.250e-05 0.2050 0.0900 0000.0000 0001.
TR alfa27 alfa26 5.675e-04 5.750e-05 0.2220 0.1130 0000.0000 0001.
    
```

```

TR   alfa26      alfa21  7.050e-04  7.000e-05  0.3430  0.1650 0000.0000 0001.
TR   S/E3        alfa13  7.925e-04  7.750e-05  0.3570  0.1590 0000.0000 0001.
TR   alfa13      alfa12  3.450e-04  3.500e-05  0.2610  0.1230 0000.0000 0001.
TR   alfa12      alfa11  4.125e-04  4.000e-05  0.5090  0.2310 0000.0000 0001.
TR   alfa11      alfa10  6.025e-04  6.000e-05  0.3200  0.1690 0000.0000 0001.
TR   alfa10      alfa09  8.000e-04  8.000e-05  0.5990  0.3210 0000.0000 0001.
TR   alfa09      alfa08  4.700e-04  4.500e-05  0.3840  0.1730 0000.0000 0001.
TR   alfa11      alfa16  8.250e-04  8.250e-05  0.4070  0.1990 0000.0000 0001.
TR   alfa16      alfa17  4.500e-04  4.500e-05  0.3600  0.1740 0000.0000 0001.
TR   alfa17      alfa18  7.750e-04  7.750e-05  0.5500  0.2710 0000.0000 0001.
TR   alfa18      alfa23  7.100e-04  7.250e-05  0.2090  0.0960 0000.0000 0001.
TR   S/E4        alfa40  7.975e-04  8.000e-05  0.5850  0.2790 0000.0000 0001.
TR   alfa40      alfa39  6.200e-04  6.250e-05  0.3270  0.1740 0000.0000 0001.
TR   alfa39      alfa38  7.675e-04  7.750e-05  0.2610  0.1110 0000.0000 0001.
TR   alfa38      alfa37  3.650e-04  3.750e-05  0.3020  0.1490 0000.0000 0001.
TR   alfa37      alfa36  6.375e-04  6.500e-05  0.4230  0.1880 0000.0000 0001.
TR   alfa36      alfa35  6.025e-04  6.000e-05  0.3770  0.1740 0000.0000 0001.
TR   alfa39      alfa24  6.300e-04  6.500e-05  0.5310  0.2450 0000.0000 0001.
TR   alfa36      alfa28  6.025e-04  6.000e-05  0.3700  0.1950 0000.0000 0001.
CTR  aaaaaaaaaa  aaaaaaaaaa  ####.####  ####.####  ####.####  ####.####  ####.####
cEN  aaaaaaaaaa  aaaaaaaaaa  ####.####  ####.####  ####.####
EN   alfa15      alfa17  4.875e-04  5.000e-05
EN   alfa20      alfa21  6.575e-04  6.750e-05
EN   alfa21      alfa25  3.750e-04  3.750e-05
EN   alfa25      alfa28  3.200e-04  3.250e-05
EN   alfa23      alfa24  3.600e-04  3.750e-05
EN   alfa34      alfa35  3.200e-04  3.250e-05
cEN  aaaaaaaaaa  aaaaaaaaaa  ####.####  ####.####

```

## C Datos de Subestaciones

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
NOMBRE      TensiOn
              pu
cSE aaaaaaaaaa  ####.####  ####.####  0000.0000
cSE Nombre S/E 0000.0000 0000.0000
SE   S/E1      1.      0.      00001.0000
SE   S/E2      1.      0.      00001.0000
SE   S/E3      1.      0.      00001.0000
SE   S/E4      1.      0.      00001.0000
cSE aaaaaaaaaa  ####.####  ####.####

```

**Caso 11 Au1000**

Este ejemplo se diseñó con base en la anterior para revisar el comportamiento ante casos grande. Es muy mallada, y dió algunas características especiales para el algoritmo de sarrollado, como desplazarse el óptimo a lo ancho del árbol.

## C DATOS DE UNA RED GRANDE DE PRUEBA

## C Nombre del caso

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789

```

```

CTI      aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
TI       Red Augug Aumentada a 1000
CTI      aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
NP000000
NH0002000
cNH0001000
C        Valores Base
          1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C        SBASE      VBASE
C        MVA        kV
cBA      #####     #####     #####
BA       1.0000    20.0000
cBA      #####     #####     #####
    
```

```

C        Datos de tramos
          1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C        ENVIO      RECEPCION      Impedancia      Potencia      Reactiva
C        R_tramo    X_tramo          P_Nudo_R      Q_Nudo_R      QC_Nudo_R
C        pu         pu                pu           pu           pu
cTR      aaaaaaaaaa aaaaaaaaaa #####.#### #####.#### #####.#### #####.#### #####.####
cTR      Nudo_EnvIo NudoRecepc 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0001.
TR       S/E1      alfa01      3.975e-04 4.000e-05 0.4290 0.2100 0000.0000 0001.
TR       alfa01    alfa02    5.900e-04 6.000e-05 0.4550 0.2280 0000.0000 0001.
TR       alfa02    alfa03    4.625e-04 4.750e-05 0.3070 0.1450 0000.0000 0001.
TR       alfa03    alfa04    7.850e-04 8.000e-05 0.5000 0.2360 0000.0000 0001.
TR       alfa04    alfa05    5.450e-04 5.500e-05 0.5810 0.2890 0000.0000 0001.
TR       alfa05    alfa06    7.625e-04 7.750e-05 0.2340 0.1070 0000.0000 0001.
TR       alfa06    alfa07    8.600e-04 8.750e-05 0.4150 0.2170 0000.0000 0001.
TR       alfa03    alfa14    5.775e-04 5.750e-05 0.3780 0.1810 0000.0000 0001.
TR       alfa14    alfa20    5.550e-04 5.500e-05 0.4840 0.2380 0000.0000 0001.
TR       alfa06    alfa15    8.175e-04 8.250e-05 0.3540 0.1630 0000.0000 0001.
TR       alfa168   alfa353   8.175e-04 8.250e-05 0.3540 0.1630 0000.0000 0001.
TR       alfa15    alfa19    6.250e-04 6.250e-05 0.4450 0.2030 0000.0000 0001.
TR       alfa19    alfa22    4.650e-04 4.750e-05 0.4630 0.2440 0000.0000 0001.
TR       alfa22    alfa25    3.550e-04 3.500e-05 0.2750 0.1290 0000.0000 0001.
TR       S/E2      alfa29    7.175e-04 7.250e-05 0.5530 0.2780 0000.0000 0001.
TR       alfa29    alfa30    8.225e-04 8.250e-05 0.2150 0.1040 0000.0000 0001.
TR       alfa30    alfa31    5.450e-04 5.500e-05 0.3210 0.1520 0000.0000 0001.
TR       alfa31    alfa32    4.625e-04 4.750e-05 0.2060 0.0970 0000.0000 0001.
TR       alfa32    alfa33    4.800e-04 4.750e-05 0.2090 0.1030 0000.0000 0001.
TR       alfa33    alfa34    6.475e-04 6.500e-05 0.5120 0.2320 0000.0000 0001.
TR       alfa30    alfa27    7.325e-04 7.250e-05 0.2050 0.0900 0000.0000 0001.
TR       alfa27    alfa26    5.675e-04 5.750e-05 0.2220 0.1130 0000.0000 0001.
TR       alfa26    alfa21    7.050e-04 7.000e-05 0.3430 0.1650 0000.0000 0001.
TR       S/E3      alfa13    7.925e-04 7.750e-05 0.3570 0.1590 0000.0000 0001.
TR       alfa13    alfa12    3.450e-04 3.500e-05 0.2610 0.1230 0000.0000 0001.
TR       alfa12    alfa11    4.125e-04 4.000e-05 0.5090 0.2310 0000.0000 0001.
TR       alfa11    alfa10    6.025e-04 6.000e-05 0.3200 0.1690 0000.0000 0001.
TR       alfa10    alfa09    8.000e-04 8.000e-05 0.5990 0.3210 0000.0000 0001.
TR       alfa09    alfa08    4.700e-04 4.500e-05 0.3840 0.1730 0000.0000 0001.
TR       alfa11    alfa16    8.250e-04 8.250e-05 0.4070 0.1990 0000.0000 0001.
TR       alfa16    alfa17    4.500e-04 4.500e-05 0.3600 0.1740 0000.0000 0001.
TR       alfa17    alfa18    7.750e-04 7.750e-05 0.5500 0.2710 0000.0000 0001.
TR       alfa18    alfa23    7.100e-04 7.250e-05 0.2090 0.0960 0000.0000 0001.
TR       S/E4      alfa40    7.975e-04 8.000e-05 0.5850 0.2790 0000.0000 0001.
TR       alfa40    alfa39    6.200e-04 6.250e-05 0.3270 0.1740 0000.0000 0001.
    
```

TR	alfa39	alfa38	7.675e-04	7.750e-05	0.2610	0.1110	0000.0000	0001.
TR	alfa38	alfa37	3.650e-04	3.750e-05	0.3020	0.1490	0000.0000	0001.
TR	alfa37	alfa36	6.375e-04	6.500e-05	0.4230	0.1880	0000.0000	0001.
TR	alfa36	alfa35	6.025e-04	6.000e-05	0.3770	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa39	alfa44	6.300e-04	6.500e-05	0.5310	0.2450	0000.0000	0001.
TR	alfa36	alfa28	6.025e-04	6.000e-05	0.3700	0.1950	0000.0000	0001.
EN	alfa15	alfa17	4.875e-04	5.000e-05				0001.
EN	alfa20	alfa21	6.575e-04	6.750e-05				0001.
EN	alfa21	alfa25	3.750e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa25	alfa28	3.200e-04	3.250e-05				0001.
EN	alfa23	alfa24	3.600e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa34	alfa35	3.200e-04	3.250e-05				0001.
TR	S/E1	alfa41	3.975e-04	4.000e-05	0.4290	0.2100	0000.0000	0001.
TR	alfa41	alfa42	5.900e-04	6.000e-05	0.4550	0.2280	0000.0000	0001.
TR	alfa42	alfa43	4.625e-04	4.750e-05	0.3070	0.1450	0000.0000	0001.
TR	alfa43	alfa24	7.850e-04	8.000e-05	0.5000	0.2360	0000.0000	0001.
TR	alfa44	alfa45	5.450e-04	5.500e-05	0.5810	0.2890	0000.0000	0001.
TR	alfa45	alfa46	7.625e-04	7.750e-05	0.2340	0.1070	0000.0000	0001.
TR	alfa46	alfa47	8.600e-04	8.750e-05	0.4150	0.2170	0000.0000	0001.
TR	alfa43	alfa54	5.775e-04	5.750e-05	0.3780	0.1810	0000.0000	0001.
TR	alfa54	alfa60	5.550e-04	5.500e-05	0.4840	0.2380	0000.0000	0001.
TR	alfa46	alfa55	8.175e-04	8.250e-05	0.3540	0.1630	0000.0000	0001.
TR	alfa55	alfa59	6.250e-04	6.250e-05	0.4450	0.2030	0000.0000	0001.
TR	alfa59	alfa62	4.650e-04	4.750e-05	0.4630	0.2440	0000.0000	0001.
TR	alfa62	alfa65	3.550e-04	3.500e-05	0.2750	0.1290	0000.0000	0001.
EN	alfa47	alfa48	4.750e-04	4.750e-05			0000.0000	0001.
TR	S/E2	alfa69	7.175e-04	7.250e-05	0.5530	0.2780	0000.0000	0001.
TR	alfa69	alfa70	8.225e-04	8.250e-05	0.2150	0.1040	0000.0000	0001.
TR	alfa70	alfa71	5.450e-04	5.500e-05	0.3210	0.1520	0000.0000	0001.
TR	alfa71	alfa72	4.625e-04	4.750e-05	0.2060	0.0970	0000.0000	0001.
TR	alfa72	alfa73	4.800e-04	4.750e-05	0.2090	0.1030	0000.0000	0001.
TR	alfa73	alfa74	6.475e-04	6.500e-05	0.5120	0.2320	0000.0000	0001.
TR	alfa70	alfa67	7.325e-04	7.250e-05	0.2050	0.0900	0000.0000	0001.
TR	alfa67	alfa66	5.675e-04	5.750e-05	0.2220	0.1130	0000.0000	0001.
TR	alfa66	alfa61	7.050e-04	7.000e-05	0.3430	0.1650	0000.0000	0001.
TR	S/E3	alfa53	7.925e-04	7.750e-05	0.3570	0.1590	0000.0000	0001.
TR	alfa53	alfa52	3.450e-04	3.500e-05	0.2610	0.1230	0000.0000	0001.
TR	alfa52	alfa51	4.125e-04	4.000e-05	0.5090	0.2310	0000.0000	0001.
TR	alfa51	alfa50	6.025e-04	6.000e-05	0.3200	0.1690	0000.0000	0001.
TR	alfa50	alfa49	8.000e-04	8.000e-05	0.5990	0.3210	0000.0000	0001.
TR	alfa49	alfa48	4.700e-04	4.500e-05	0.3840	0.1730	0000.0000	0001.
TR	alfa51	alfa56	8.250e-04	8.250e-05	0.4070	0.1990	0000.0000	0001.
TR	alfa56	alfa57	4.500e-04	4.500e-05	0.3600	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa57	alfa58	7.750e-04	7.750e-05	0.5500	0.2710	0000.0000	0001.
TR	alfa58	alfa63	7.100e-04	7.250e-05	0.2090	0.0960	0000.0000	0001.
TR	S/E4	alfa80	7.975e-04	8.000e-05	0.5850	0.2790	0000.0000	0001.
TR	alfa80	alfa79	6.200e-04	6.250e-05	0.3270	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa79	alfa78	7.675e-04	7.750e-05	0.2610	0.1110	0000.0000	0001.
TR	alfa78	alfa77	3.650e-04	3.750e-05	0.3020	0.1490	0000.0000	0001.
TR	alfa77	alfa76	6.375e-04	6.500e-05	0.4230	0.1880	0000.0000	0001.
TR	alfa76	alfa75	6.025e-04	6.000e-05	0.3770	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa79	alfa64	6.300e-04	6.500e-05	0.5310	0.2450	0000.0000	0001.
TR	alfa76	alfa68	6.025e-04	6.000e-05	0.3700	0.1950	0000.0000	0001.
EN	alfa55	alfa57	4.875e-04	5.000e-05				0001.
EN	alfa60	alfa61	6.575e-04	6.750e-05				0001.
EN	alfa61	alfa65	3.750e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa65	alfa68	3.200e-04	3.250e-05				0001.
EN	alfa63	alfa64	3.600e-04	3.750e-05				0001.

TR	S/E1	alfa81	3.975e-04	4.000e-05	0.4290	0.2100	0000.0000	0001.
TR	alfa81	alfa82	5.900e-04	6.000e-05	0.4550	0.2280	0000.0000	0001.
TR	alfa82	alfa83	4.625e-04	4.750e-05	0.3070	0.1450	0000.0000	0001.
TR	alfa251	alfa366	4.625e-04	4.750e-05	0.3070	0.1450	0000.0000	0001.
TR	alfa83	alfa84	7.850e-04	8.000e-05	0.5000	0.2360	0000.0000	0001.
TR	alfa84	alfa85	5.450e-04	5.500e-05	0.5810	0.2890	0000.0000	0001.
TR	alfa85	alfa86	7.625e-04	7.750e-05	0.2340	0.1070	0000.0000	0001.
TR	alfa86	alfa87	8.600e-04	8.750e-05	0.4150	0.2170	0000.0000	0001.
TR	alfa83	alfa94	5.775e-04	5.750e-05	0.3780	0.1810	0000.0000	0001.
TR	alfa94	alfa100	5.550e-04	5.500e-05	0.4840	0.2380	0000.0000	0001.
TR	alfa86	alfa95	8.175e-04	8.250e-05	0.3540	0.1630	0000.0000	0001.
TR	alfa95	alfa99	6.250e-04	6.250e-05	0.4450	0.2030	0000.0000	0001.
TR	alfa109	alfa102	4.650e-04	4.750e-05	0.4630	0.2440	0000.0000	0001.
TR	alfa102	alfa105	3.550e-04	3.500e-05	0.2750	0.1290	0000.0000	0001.
EN	alfa107	alfa88	4.750e-04	4.750e-05			0000.0000	0001.
TR	S/E2	alfa109	7.175e-04	7.250e-05	0.5530	0.2780	0000.0000	0001.
TR	alfa109	alfa110	8.225e-04	8.250e-05	0.2150	0.1040	0000.0000	0001.
TR	alfa110	alfa111	5.450e-04	5.500e-05	0.3210	0.1520	0000.0000	0001.
TR	alfa111	alfa112	4.625e-04	4.750e-05	0.2060	0.0970	0000.0000	0001.
TR	alfa112	alfa113	4.800e-04	4.750e-05	0.2090	0.1030	0000.0000	0001.
TR	alfa113	alfa114	6.475e-04	6.500e-05	0.5120	0.2030	0000.0000	0001.
TR	alfa113	alfa359	6.475e-04	6.500e-05	0.5120	0.2320	0000.0000	0001.
TR	alfa110	alfa107	7.325e-04	7.250e-05	0.2050	0.0900	0000.0000	0001.
TR	alfa107	alfa106	5.675e-04	5.750e-05	0.2220	0.1130	0000.0000	0001.
TR	alfa106	alfa101	7.050e-04	7.000e-05	0.3430	0.1650	0000.0000	0001.
TR	S/E3	alfa93	7.925e-04	7.750e-05	0.3570	0.1590	0000.0000	0001.
TR	alfa93	alfa92	3.450e-04	3.500e-05	0.2610	0.1230	0000.0000	0001.
TR	alfa92	alfa91	4.125e-04	4.000e-05	0.5090	0.2310	0000.0000	0001.
TR	alfa91	alfa90	6.025e-04	6.000e-05	0.3200	0.1690	0000.0000	0001.
TR	alfa90	alfa89	8.000e-04	8.000e-05	0.5990	0.3210	0000.0000	0001.
TR	alfa89	alfa88	4.700e-04	4.500e-05	0.3840	0.1730	0000.0000	0001.
TR	alfa91	alfa96	8.250e-04	8.250e-05	0.4070	0.1990	0000.0000	0001.
TR	alfa96	alfa97	4.500e-04	4.500e-05	0.3600	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa97	alfa98	7.750e-04	7.750e-05	0.5500	0.2710	0000.0000	0001.
TR	alfa98	alfa103	7.100e-04	7.250e-05	0.2090	0.0960	0000.0000	0001.
TR	S/E4	alfa120	7.975e-04	8.000e-05	0.5850	0.2790	0000.0000	0001.
TR	alfa120	alfa119	6.200e-04	6.250e-05	0.3270	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa119	alfa118	7.675e-04	7.750e-05	0.2610	0.1110	0000.0000	0001.
TR	alfa118	alfa117	3.650e-04	3.750e-05	0.3020	0.1490	0000.0000	0001.
TR	alfa117	alfa116	6.375e-04	6.500e-05	0.4230	0.1880	0000.0000	0001.
TR	alfa116	alfa115	6.025e-04	6.000e-05	0.3770	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa119	alfa104	6.300e-04	6.500e-05	0.5310	0.2450	0000.0000	0001.
TR	alfa116	alfa108	6.025e-04	6.000e-05	0.3700	0.1950	0000.0000	0001.
EN	alfa55	alfa97	4.875e-04	5.000e-05				0001.
EN	alfa60	alfa101	6.575e-04	6.750e-05				0001.
EN	alfa61	alfa105	3.750e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa65	alfa108	3.200e-04	3.250e-05				0001.
EN	alfa63	alfa104	3.600e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa64	alfa115	3.200e-04	3.250e-05				0001.
TR	S/E1	alfa161	3.975e-04	4.000e-05	0.4290	0.2100	0000.0000	0001.
TR	alfa161	alfa162	5.900e-04	6.000e-05	0.4550	0.2280	0000.0000	0001.
TR	alfa162	alfa163	4.625e-04	4.750e-05	0.3070	0.1450	0000.0000	0001.
TR	alfa163	alfa164	7.850e-04	8.000e-05	0.5000	0.2360	0000.0000	0001.
TR	alfa164	alfa165	5.450e-04	5.500e-05	0.5810	0.2890	0000.0000	0001.
TR	alfa165	alfa166	7.625e-04	7.750e-05	0.2340	0.1070	0000.0000	0001.
TR	alfa166	alfa167	8.600e-04	8.750e-05	0.4150	0.2170	0000.0000	0001.
TR	alfa163	alfa141	5.775e-04	5.750e-05	0.3780	0.1810	0000.0000	0001.
TR	alfa174	alfa180	5.550e-04	5.500e-05	0.4840	0.2380	0000.0000	0001.

TR	alfa166	alfa175	8.175e-04	8.250e-05	0.3540	0.1630	0000.0000	0001.
TR	alfa175	alfa179	6.250e-04	6.250e-05	0.4450	0.2030	0000.0000	0001.
TR	alfa189	alfa182	4.650e-04	4.750e-05	0.4630	0.2440	0000.0000	0001.
TR	alfa182	alfa185	3.550e-04	3.500e-05	0.2750	0.1290	0000.0000	0001.
EN	alfa187	alfa168	4.750e-04	4.750e-05			0000.0000	0001.
TR	S/E2	alfa189	7.175e-04	7.250e-05	0.5530	0.2780	0000.0000	0001.
TR	alfa189	alfa190	8.225e-04	8.250e-05	0.2150	0.1040	0000.0000	0001.
TR	alfa180	alfa315	8.225e-04	8.250e-05	0.2150	0.1040	0000.0000	0001.
TR	alfa190	alfa191	5.450e-04	5.500e-05	0.3210	0.1520	0000.0000	0001.
TR	alfa191	alfa192	4.625e-04	4.750e-05	0.2060	0.0970	0000.0000	0001.
TR	alfa192	alfa193	4.800e-04	4.750e-05	0.2090	0.1030	0000.0000	0001.
TR	alfa153	alfa194	6.475e-04	6.500e-05	0.5120	0.2320	0000.0000	0001.
TR	alfa190	alfa187	7.325e-04	7.250e-05	0.2050	0.0900	0000.0000	0001.
TR	alfa187	alfa186	5.675e-04	5.750e-05	0.2220	0.1130	0000.0000	0001.
TR	alfa186	alfa181	7.050e-04	7.000e-05	0.3430	0.1650	0000.0000	0001.
TR	S/E3	alfa173	7.925e-04	7.750e-05	0.3570	0.1590	0000.0000	0001.
TR	alfa173	alfa172	3.450e-04	3.500e-05	0.2610	0.1230	0000.0000	0001.
TR	alfa172	alfa171	4.125e-04	4.000e-05	0.5090	0.2310	0000.0000	0001.
TR	alfa171	alfa170	6.025e-04	6.000e-05	0.3200	0.1690	0000.0000	0001.
TR	alfa170	alfa169	8.000e-04	8.000e-05	0.5990	0.3210	0000.0000	0001.
TR	alfa169	alfa124	4.700e-04	4.500e-05	0.3840	0.1730	0000.0000	0001.
TR	alfa171	alfa122	8.250e-04	8.250e-05	0.4070	0.1990	0000.0000	0001.
TR	alfa176	alfa177	4.500e-04	4.500e-05	0.3600	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa177	alfa178	7.750e-04	7.750e-05	0.5500	0.2710	0000.0000	0001.
TR	alfa178	alfa183	7.100e-04	7.250e-05	0.2090	0.0960	0000.0000	0001.
TR	S/E4	alfa200	7.975e-04	8.000e-05	0.5850	0.2790	0000.0000	0001.
TR	alfa160	alfa199	6.200e-04	6.250e-05	0.3270	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa199	alfa198	7.675e-04	7.750e-05	0.2610	0.1110	0000.0000	0001.
TR	alfa198	alfa197	3.650e-04	3.750e-05	0.3020	0.1490	0000.0000	0001.
TR	alfa197	alfa196	6.375e-04	6.500e-05	0.4230	0.1880	0000.0000	0001.
TR	alfa258	alfa307	6.375e-04	6.500e-05	0.4230	0.1880	0000.0000	0001.
TR	alfa196	alfa195	6.025e-04	6.000e-05	0.3770	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa195	alfa184	6.300e-04	6.500e-05	0.5310	0.2450	0000.0000	0001.
TR	alfa196	alfa188	6.025e-04	6.000e-05	0.3700	0.1950	0000.0000	0001.
EN	alfa195	alfa177	4.875e-04	5.000e-05				0001.
EN	alfa140	alfa181	6.575e-04	6.750e-05				0001.
EN	alfa141	alfa185	3.750e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa205	alfa188	3.200e-04	3.250e-05				0001.
EN	alfa143	alfa184	3.600e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa144	alfa195	3.200e-04	3.250e-05				0001.
TR	S/E1	alfa201	3.975e-04	4.000e-05	0.4290	0.2100	0000.0000	0001.
TR	alfa201	alfa202	5.900e-04	6.000e-05	0.4550	0.2280	0000.0000	0001.
TR	alfa120	alfa203	4.625e-04	4.750e-05	0.3070	0.1450	0000.0000	0001.
TR	alfa203	alfa144	7.850e-04	8.000e-05	0.5000	0.2360	0000.0000	0001.
TR	alfa204	alfa205	5.450e-04	5.500e-05	0.5810	0.2890	0000.0000	0001.
TR	alfa207	alfa320	5.450e-04	5.500e-05	0.5810	0.2890	0000.0000	0001.
TR	alfa205	alfa206	7.625e-04	7.750e-05	0.2340	0.1070	0000.0000	0001.
TR	alfa206	alfa207	8.600e-04	8.750e-05	0.4150	0.2170	0000.0000	0001.
TR	alfa203	alfa204	5.775e-04	5.750e-05	0.3780	0.1810	0000.0000	0001.
TR	alfa214	alfa220	5.550e-04	5.500e-05	0.4840	0.2380	0000.0000	0001.
TR	alfa206	alfa235	8.175e-04	8.250e-05	0.3540	0.1630	0000.0000	0001.
TR	alfa215	alfa239	6.250e-04	6.250e-05	0.4450	0.2030	0000.0000	0001.
TR	alfa229	alfa222	4.650e-04	4.750e-05	0.4630	0.2440	0000.0000	0001.
TR	alfa222	alfa225	3.550e-04	3.500e-05	0.2750	0.1290	0000.0000	0001.
EN	alfa227	alfa208	4.750e-04	4.750e-05			0000.0000	0001.
TR	S/E2	alfa229	7.175e-04	7.250e-05	0.5530	0.2780	0000.0000	0001.
TR	alfa229	alfa230	8.225e-04	8.250e-05	0.2150	0.1040	0000.0000	0001.
TR	alfa230	alfa231	5.450e-04	5.500e-05	0.3210	0.1520	0000.0000	0001.

TR	alfa123	alfa232	4.625e-04	4.750e-05	0.2060	0.0970	0000.0000	0001.
TR	alfa232	alfa233	4.800e-04	4.750e-05	0.2090	0.1030	0000.0000	0001.
TR	alfa233	alfa234	6.475e-04	6.500e-05	0.5120	0.2320	0000.0000	0001.
TR	alfa230	alfa227	7.325e-04	7.250e-05	0.2050	0.0900	0000.0000	0001.
TR	alfa227	alfa226	5.675e-04	5.750e-05	0.2220	0.1130	0000.0000	0001.
TR	alfa226	alfa221	7.050e-04	7.000e-05	0.3430	0.1650	0000.0000	0001.
TR	S/E3	alfa213	7.925e-04	7.750e-05	0.3570	0.1590	0000.0000	0001.
TR	alfa233	alfa212	3.450e-04	3.500e-05	0.2610	0.1230	0000.0000	0001.
TR	alfa232	alfa240	4.125e-04	4.000e-05	0.5090	0.2310	0000.0000	0001.
TR	alfa231	alfa210	6.025e-04	6.000e-05	0.3200	0.1690	0000.0000	0001.
TR	alfa230	alfa209	8.000e-04	8.000e-05	0.5990	0.3210	0000.0000	0001.
TR	alfa209	alfa208	4.700e-04	4.500e-05	0.3840	0.1730	0000.0000	0001.
TR	alfa231	alfa145	8.250e-04	8.250e-05	0.4070	0.1990	0000.0000	0001.
TR	alfa236	alfa217	4.500e-04	4.500e-05	0.3600	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa237	alfa215	7.750e-04	7.750e-05	0.5500	0.2710	0000.0000	0001.
TR	alfa238	alfa223	7.100e-04	7.250e-05	0.2090	0.0960	0000.0000	0001.
TR	S/E4	alfa125	7.975e-04	8.000e-05	0.5850	0.2790	0000.0000	0001.
TR	alfa200	alfa159	6.200e-04	6.250e-05	0.3270	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa219	alfa228	7.675e-04	7.750e-05	0.2610	0.1110	0000.0000	0001.
TR	alfa218	alfa236	3.650e-04	3.750e-05	0.3020	0.1490	0000.0000	0001.
TR	alfa197	alfa130	6.375e-04	6.500e-05	0.4230	0.1880	0000.0000	0001.
TR	alfa196	alfa131	6.025e-04	6.000e-05	0.3770	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa195	alfa303	6.300e-04	6.500e-05	0.5310	0.2450	0000.0000	0001.
TR	alfa196	alfa318	6.025e-04	6.000e-05	0.3700	0.1950	0000.0000	0001.
EN	alfa185	alfa177	4.875e-04	5.000e-05				0001.
EN	alfa180	alfa181	6.575e-04	6.750e-05				0001.
EN	alfa181	alfa223	3.750e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa185	alfa218	3.200e-04	3.250e-05				0001.
EN	alfa199	alfa184	3.600e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa184	alfa132	3.200e-04	3.250e-05				0001.
TR	S/E1	alfa241	3.975e-04	4.000e-05	0.4290	0.2100	0000.0000	0001.
TR	alfa241	alfa242	5.900e-04	6.000e-05	0.4550	0.2280	0000.0000	0001.
TR	alfa160	alfa243	4.625e-04	4.750e-05	0.3070	0.1450	0000.0000	0001.
TR	alfa243	alfa244	7.850e-04	8.000e-05	0.5000	0.2360	0000.0000	0001.
TR	alfa244	alfa245	5.450e-04	5.500e-05	0.5810	0.2890	0000.0000	0001.
TR	alfa245	alfa246	7.625e-04	7.750e-05	0.2340	0.1070	0000.0000	0001.
TR	alfa246	alfa247	8.600e-04	8.750e-05	0.4150	0.2170	0000.0000	0001.
TR	alfa243	alfa157	5.775e-04	5.750e-05	0.3780	0.1810	0000.0000	0001.
TR	alfa235	alfa254	5.550e-04	5.500e-05	0.4840	0.2380	0000.0000	0001.
TR	alfa246	alfa255	8.175e-04	8.250e-05	0.3540	0.1630	0000.0000	0001.
TR	alfa255	alfa259	6.250e-04	6.250e-05	0.4450	0.2030	0000.0000	0001.
TR	alfa269	alfa262	4.650e-04	4.750e-05	0.4630	0.2440	0000.0000	0001.
TR	alfa262	alfa265	3.550e-04	3.500e-05	0.2750	0.1290	0000.0000	0001.
EN	alfa267	alfa248	4.750e-04	4.750e-05			0000.0000	0001.
TR	S/E2	alfa269	7.175e-04	7.250e-05	0.5530	0.2780	0000.0000	0001.
TR	alfa269	alfa136	8.225e-04	8.250e-05	0.2150	0.1040	0000.0000	0001.
TR	alfa270	alfa271	5.450e-04	5.500e-05	0.3210	0.1520	0000.0000	0001.
TR	alfa163	alfa272	4.625e-04	4.750e-05	0.2060	0.0970	0000.0000	0001.
TR	alfa272	alfa273	4.800e-04	4.750e-05	0.2090	0.1030	0000.0000	0001.
TR	alfa273	alfa274	6.475e-04	6.500e-05	0.5120	0.2320	0000.0000	0001.
TR	alfa270	alfa277	7.325e-04	7.250e-05	0.2050	0.0900	0000.0000	0001.
TR	alfa267	alfa286	5.675e-04	5.750e-05	0.2220	0.1130	0000.0000	0001.
TR	alfa266	alfa281	7.050e-04	7.000e-05	0.3430	0.1650	0000.0000	0001.
TR	S/E3	alfa270	7.925e-04	7.750e-05	0.3570	0.1590	0000.0000	0001.
TR	alfa273	alfa135	3.450e-04	3.500e-05	0.2610	0.1230	0000.0000	0001.
TR	alfa272	alfa134	4.125e-04	4.000e-05	0.5090	0.2310	0000.0000	0001.
TR	alfa271	alfa133	6.025e-04	6.000e-05	0.3200	0.1690	0000.0000	0001.
TR	alfa270	alfa249	8.000e-04	8.000e-05	0.5990	0.3210	0000.0000	0001.

TR	alfa249	alfa168	4.700e-04	4.500e-05	0.3840	0.1730	0000.0000	0001.
TR	alfa271	alfa123	8.250e-04	8.250e-05	0.4070	0.1990	0000.0000	0001.
TR	alfa276	alfa129	4.500e-04	4.500e-05	0.3600	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa277	alfa126	7.750e-04	7.750e-05	0.5500	0.2710	0000.0000	0001.
TR	alfa278	alfa127	7.100e-04	7.250e-05	0.2090	0.0960	0000.0000	0001.
TR	S/E4	alfa152	7.975e-04	8.000e-05	0.5850	0.2790	0000.0000	0001.
TR	alfa280	alfa216	6.200e-04	6.250e-05	0.3270	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa259	alfa278	7.675e-04	7.750e-05	0.2610	0.1110	0000.0000	0001.
TR	alfa278	alfa137	3.650e-04	3.750e-05	0.3020	0.1490	0000.0000	0001.
TR	alfa277	alfa276	6.375e-04	6.500e-05	0.4230	0.1880	0000.0000	0001.
TR	alfa276	alfa275	6.025e-04	6.000e-05	0.3770	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa275	alfa278	6.300e-04	6.500e-05	0.5310	0.2450	0000.0000	0001.
FR	alfa276	alfa288	6.025e-04	6.000e-05	0.3700	0.1950	0000.0000	0001.
EN	alfa265	alfa177	4.875e-04	5.000e-05				0001.
EN	alfa260	alfa111	6.575e-04	6.750e-05				0001.
EN	alfa261	alfa185	3.750e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa285	alfa188	3.200e-04	3.250e-05				0001.
EN	alfa263	alfa129	3.600e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa264	alfa195	3.200e-04	3.250e-05				0001.
TR	S/E1	alfa160	3.975e-04	4.000e-05	0.4290	0.2100	0000.0000	0001.
TR	alfa281	alfa322	5.900e-04	6.000e-05	0.4550	0.2280	0000.0000	0001.
TR	alfa160	alfa283	4.625e-04	4.750e-05	0.3070	0.1450	0000.0000	0001.
TR	alfa283	alfa284	7.850e-04	8.000e-05	0.5000	0.2360	0000.0000	0001.
TR	alfa284	alfa285	5.450e-04	5.500e-05	0.5810	0.2890	0000.0000	0001.
TR	alfa235	alfa238	7.625e-04	7.750e-05	0.2340	0.1070	0000.0000	0001.
TR	alfa218	alfa287	8.600e-04	8.750e-05	0.4150	0.2170	0000.0000	0001.
TR	alfa283	alfa121	5.775e-04	5.750e-05	0.3780	0.1810	0000.0000	0001.
TR	alfa294	alfa300	5.550e-04	5.500e-05	0.4840	0.2380	0000.0000	0001.
TR	alfa306	alfa295	8.175e-04	8.250e-05	0.3540	0.1630	0000.0000	0001.
TR	alfa315	alfa299	6.250e-04	6.250e-05	0.4450	0.2030	0000.0000	0001.
TR	alfa130	alfa294	6.250e-04	6.250e-05	0.4450	0.2030	0000.0000	0001.
TR	alfa309	alfa302	4.650e-04	4.750e-05	0.4630	0.2440	0000.0000	0001.
TR	alfa302	alfa305	3.550e-04	3.500e-05	0.2750	0.1290	0000.0000	0001.
EN	alfa307	alfa288	4.750e-04	4.750e-05			0000.0000	0001.
TR	S/E2	alfa309	7.175e-04	7.250e-05	0.5530	0.2780	0000.0000	0001.
TR	alfa309	alfa310	8.225e-04	8.250e-05	0.2150	0.1040	0000.0000	0001.
TR	alfa310	alfa311	5.450e-04	5.500e-05	0.3210	0.1520	0000.0000	0001.
TR	alfa303	alfa143	4.625e-04	4.750e-05	0.2060	0.0970	0000.0000	0001.
TR	alfa312	alfa224	4.800e-04	4.750e-05	0.2090	0.1030	0000.0000	0001.
TR	alfa313	alfa314	6.475e-04	6.500e-05	0.5120	0.2320	0000.0000	0001.
TR	alfa310	alfa147	7.325e-04	7.250e-05	0.2050	0.0900	0000.0000	0001.
TR	alfa307	alfa326	5.675e-04	5.750e-05	0.2220	0.1130	0000.0000	0001.
TR	alfa306	alfa321	7.050e-04	7.000e-05	0.3430	0.1650	0000.0000	0001.
TR	S/E3	alfa313	7.925e-04	7.750e-05	0.3570	0.1590	0000.0000	0001.
TR	alfa313	alfa312	3.450e-04	3.500e-05	0.2610	0.1230	0000.0000	0001.
TR	alfa312	alfa142	4.125e-04	4.000e-05	0.5090	0.2310	0000.0000	0001.
TR	alfa311	alfa139	6.025e-04	6.000e-05	0.3200	0.1690	0000.0000	0001.
TR	alfa310	alfa138	8.000e-04	8.000e-05	0.5990	0.3210	0000.0000	0001.
TR	alfa309	alfa308	4.700e-04	4.500e-05	0.3840	0.1730	0000.0000	0001.
TR	alfa311	alfa306	8.250e-04	8.250e-05	0.4070	0.1990	0000.0000	0001.
TR	alfa316	alfa148	4.500e-04	4.500e-05	0.3600	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa317	alfa146	7.750e-04	7.750e-05	0.5500	0.2710	0000.0000	0001.
TR	alfa318	alfa323	7.100e-04	7.250e-05	0.2090	0.0960	0000.0000	0001.
TR	S/E4	alfa280	7.975e-04	8.000e-05	0.5850	0.2790	0000.0000	0001.
TR	alfa320	alfa319	6.200e-04	6.250e-05	0.3270	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa259	alfa149	7.675e-04	7.750e-05	0.2610	0.1110	0000.0000	0001.
TR	alfa318	alfa317	3.650e-04	3.750e-05	0.3020	0.1490	0000.0000	0001.
TR	alfa317	alfa316	6.375e-04	6.500e-05	0.4230	0.1880	0000.0000	0001.

TR	alfa316	alfa325	6.025e-04	6.000e-05	0.3770	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa315	alfa324	6.300e-04	6.500e-05	0.5310	0.2450	0000.0000	0001.
TR	alfa316	alfa328	6.025e-04	6.000e-05	0.3700	0.1950	0000.0000	0001.
EN	alfa305	alfa227	4.875e-04	5.000e-05				0001.
EN	alfa300	alfa321	6.575e-04	6.750e-05				0001.
EN	alfa201	alfa125	3.750e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa305	alfa328	3.200e-04	3.250e-05				0001.
EN	alfa303	alfa24	3.600e-04	3.750e-05				0001.
EN	alfa204	alfa135	3.200e-04	3.250e-05				0001.
TR	S/E2	alfa341	3.975e-04	4.000e-05	0.4290	0.2100	0000.0000	0001.
TR	alfa341	alfa342	5.900e-04	6.000e-05	0.4550	0.2280	0000.0000	0001.
TR	alfa342	alfa343	4.625e-04	4.750e-05	0.3070	0.1450	0000.0000	0001.
TR	alfa343	alfa344	7.850e-04	8.000e-05	0.5000	0.2360	0000.0000	0001.
TR	alfa344	alfa345	5.450e-04	5.500e-05	0.5810	0.2890	0000.0000	0001.
TR	alfa345	alfa346	7.625e-04	7.750e-05	0.2340	0.1070	0000.0000	0001.
TR	alfa346	alfa347	8.600e-04	8.750e-05	0.4150	0.2170	0000.0000	0001.
TR	alfa353	alfa354	5.775e-04	5.750e-05	0.3780	0.1810	0000.0000	0001.
TR	alfa354	alfa360	5.550e-04	5.500e-05	0.4840	0.2380	0000.0000	0001.
TR	alfa366	alfa263	8.175e-04	8.250e-05	0.3540	0.1630	0000.0000	0001.
TR	alfa263	alfa248	6.250e-04	6.250e-05	0.4450	0.2030	0000.0000	0001.
TR	alfa359	alfa352	4.650e-04	4.750e-05	0.4630	0.2440	0000.0000	0001.
TR	alfa352	alfa355	3.550e-04	3.500e-05	0.2750	0.1290	0000.0000	0001.
EN	alfa196	alfa276	4.750e-04	4.750e-05			0000.0000	0001.
TR	S/E3	alfa329	7.175e-04	7.250e-05	0.5530	0.2780	0000.0000	0001.
TR	alfa329	alfa158	8.225e-04	8.250e-05	0.2150	0.1040	0000.0000	0001.
TR	alfa158	alfa261	5.450e-04	5.500e-05	0.3210	0.1520	0000.0000	0001.
TR	alfa153	alfa219	4.625e-04	4.750e-05	0.2060	0.0970	0000.0000	0001.
TR	alfa152	alfa214	4.800e-04	4.750e-05	0.2090	0.1030	0000.0000	0001.
TR	alfa214	alfa237	6.475e-04	6.500e-05	0.5120	0.2320	0000.0000	0001.
TR	alfa140	alfa251	7.325e-04	7.250e-05	0.2050	0.0900	0000.0000	0001.
TR	alfa287	alfa266	5.675e-04	5.750e-05	0.2220	0.1130	0000.0000	0001.
TR	alfa143	alfa218	7.050e-04	7.000e-05	0.3430	0.1650	0000.0000	0001.
TR	S/E4	alfa153	7.925e-04	7.750e-05	0.3570	0.1590	0000.0000	0001.
TR	alfa313	alfa250	3.450e-04	3.500e-05	0.2610	0.1230	0000.0000	0001.
TR	alfa212	alfa211	4.125e-04	4.000e-05	0.5090	0.2310	0000.0000	0001.
TR	alfa211	alfa140	6.025e-04	6.000e-05	0.3200	0.1690	0000.0000	0001.
TR	alfa140	alfa279	8.000e-04	8.000e-05	0.5990	0.3210	0000.0000	0001.
TR	alfa279	alfa258	4.700e-04	4.500e-05	0.3840	0.1730	0000.0000	0001.
TR	alfa281	alfa267	8.250e-04	8.250e-05	0.4070	0.1990	0000.0000	0001.
TR	alfa256	alfa257	4.500e-04	4.500e-05	0.3600	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa263	alfa256	7.750e-04	7.750e-05	0.5500	0.2710	0000.0000	0001.
TR	alfa218	alfa150	7.100e-04	7.250e-05	0.2090	0.0960	0000.0000	0001.
TR	S/E1	alfa260	7.975e-04	8.000e-05	0.5850	0.2790	0000.0000	0001.
TR	alfa260	alfa151	6.200e-04	6.250e-05	0.3270	0.1740	0000.0000	0001.
TR	alfa150	alfa154	7.675e-04	7.750e-05	0.2610	0.1110	0000.0000	0001.
TR	alfa154	alfa155	3.650e-04	3.750e-05	0.3020	0.1490	0000.0000	0001.
TR	alfa155	alfa156	6.375e-04	6.500e-05	0.4230	0.1880	0000.0000	0001.
TR	alfa156	alfa174	3.650e-04	3.750e-05	0.3020	0.1490	0000.0000	0001.
TR	alfa174	alfa176	6.300e-04	6.500e-05	0.5310	0.2450	0000.0000	0001.
TR	alfa176	alfa132	6.025e-04	6.000e-05	0.3700	0.1950	0000.0000	0001.

C Datos de Subestaciones

	1	2	3	4	5	6	7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789							
NOMBRE	TensiOn						
	pu						
cSE	aaaaaaaa	####.####	####.####	#####.#####	#####.#####	#####.#####	#####.#####
cSE	Nombre S/E	0000.0000	0000.0000	000000.00000	000000.00000	000000.00000	000000.00000

```

SE      S/E1  1.    0.    0.8    0.2
SE      S/E2  1.    0.    0.8    0.2
SE      S/E3  1.    0.    0.8    0.2
SE      S/E4  1.    0.    0.8    0.2
cSE     aaaaaaaaa #####.#### #####.#### #####.#### #####.####
    
```

## Caso 12 Ejreal

Este ejemplo se tomó de una red real, y el algoritmo obtuvo su óptimo sin problemas.

C DATOS DE UN ALIMENTADOR DE PRUEBA PARA EL FLUJO RADIAL

C Nombre del caso

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
cTI   aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
      Red Aerea Real
cTI   aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa
    
```

C Valores Base

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C      SBASE      VBASE
C      MVA        kV
cBA    #####.#### #####.####
BA     100.0000   23.0000
cBA    #####.#### #####.####
cNP    ##
NP     1
cNP    ##
cNH    ##
NH     5
cNH    ##
    
```

C Datos de tramos

```

      1      2      3      4      5      6      7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
C      ENVIO      RECEPCION      Impedancia      Potencia      Reactiva
C      R_tramo    X_tramo      P_Nudo_R      Q_Nudo_R      QC_NUDO_R
C      pu         pu         pu         pu         pu
cTR   aaaaaaaaa   aaaaaaaaa   #####.#### #####.#### #####.#### #####.#### #####.####
cTR   Nudo_EnvIo  NudoRecep  0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000 0000.0000
TR   Subestac_1  alfa4     0.0750   0.1000   0.0200   0.0160 0000.0000 0001.
TR   Subestac_1  alfa22    0.0400   0.0400   0.0150   0.0120 0000.0000 0001.
TR   Subestac_1  alfa23    0.0800   0.1100   0.0100   0.0090 0000.0000 0001.
TR   Subestac_2  alfa24    0.0400   0.0400   0.0210   0.0100   0.0180 0001.
TR   Subestac_2  alfa8     0.1100   0.1100   0.0400   0.0270 0000.0000 0001.
TR   Subestac_2  alfa17    0.1100   0.1100   0.0400   0.0270 0000.0000 0001.
TR   Subestac_3  alfa13    0.1100   0.1100   0.0100   0.0090 0000.0000 0001.
TR   Subestac_3  alfa25    0.0800   0.1100   0.0100   0.0090 0000.0000 0001.
TR   Subestac_3  alfa26    0.0400   0.0400   0.0150   0.0120 0000.0000 0001.
TR   Subestac_3  alfa27    0.0800   0.1100   0.0100   0.0090 0000.0000 0001.
TR   Subestac_4  alfa28    0.1100   0.1100   0.0400   0.0270 0000.0000 0001.
TR   Subestac_4  alfa29    0.1100   0.1100   0.0400   0.0270 0000.0000 0001.
TR   Subestac_4  alfa30    0.1100   0.1100   0.0100   0.0090 0000.0000 0001.
TR   Subestac_4  alfa31    0.0800   0.1100   0.0100   0.0090 0000.0000 0001.
TR   Subestac_4  alfa32    0.0400   0.0400   0.0150   0.0120 0000.0000 0001.
    
```

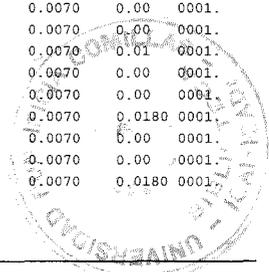
TR	Subestac_5	alfa33	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac_5	alfa34	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac_5	alfa35	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac_6	alfa36	0.1100	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac_6	alfa37	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac_7	alfa38	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	Subestac_7	alfa39	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac_7	alfa40	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac_7	alfa41	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac_7	alfa42	0.1100	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac_7	alfa43	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac_7	alfa44	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	Subestac_8	alfa45	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac_8	alfa46	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac_8	alfa47	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac_8	alfa48	0.1100	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac_9	alfa49	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac_9	alfa1	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	Subestac10	alfa2	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac10	alfa3	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac10	alfa50	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac10	alfa51	0.1100	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac10	alfa52	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac10	alfa53	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	Subestac11	alfa54	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac11	alfa55	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac11	alfa56	0.1100	0.1100	0.0400	0.0270	0000.0000	0001.
TR	Subestac12	alfa57	0.1100	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac12	alfa58	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	Subestac12	alfa59	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	Subestac12	alfa60	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa17	alfa18	0.0400	0.0400	0.0210	0.0100	0.0180	0001.
TR	alfa16	alfa20	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa18	alfa19	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa18	alfa21	0.0800	0.1100	0.0500	0.0300	0.0120	0001.
TR	alfa6	alfa7	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa13	alfa15	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa15	alfa16	0.0400	0.0400	0.0210	0.0100	0.0180	0001.
TR	alfa9	alfa12	0.0800	0.1100	0.0450	0.0200	0.0370	0001.
TR	alfa8	alfa9	0.0800	0.1100	0.0500	0.0300	0.0120	0001.
TR	alfa8	alfa10	0.1100	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa9	alfa11	0.1100	0.1100	0.0060	0.0010	0.0060	0001.
TR	alfa4	alfa5	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa4	alfa6	0.0900	0.1800	0.0200	0.0080	0.0120	0001.
TR	alfa13	alfa14	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa5	alfa61	0.0400	0.0400	0.0210	0.0100	0.0180	0001.
TR	alfa22	alfa62	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa22	alfa63	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa23	alfa64	0.0800	0.1100	0.0500	0.0300	0.0120	0001.
TR	alfa24	alfa65	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa25	alfa66	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa25	alfa67	0.0400	0.0400	0.0210	0.0100	0.0180	0001.
TR	alfa26	alfa68	0.0800	0.1100	0.0450	0.0200	0.0370	0001.
TR	alfa27	alfa69	0.0800	0.1100	0.0500	0.0300	0.0120	0001.
TR	alfa28	alfa70	0.1100	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa29	alfa71	0.1100	0.1100	0.0060	0.0010	0.0060	0001.
TR	alfa30	alfa72	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa30	alfa73	0.0900	0.1800	0.0200	0.0080	0.0120	0001.

TR	alfa31	alfa74	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa32	alfa75	0.0400	0.0400	0.0210	0.0100	0.0180	0001.
TR	alfa68	alfa76	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa69	alfa77	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa70	alfa78	0.0800	0.1100	0.0500	0.0300	0.0180	0001.
TR	alfa78	alfa79	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa71	alfa80	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa73	alfa81	0.0400	0.0400	0.0210	0.0100	0.0180	0001.
TR	alfa81	alfa82	0.0800	0.1100	0.0450	0.0200	0.0370	0001.
TR	alfa64	alfa83	0.0800	0.1100	0.0500	0.0300	0.0120	0001.
TR	alfa83	alfa84	0.1100	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa39	alfa85	0.1100	0.1100	0.0060	0.0010	0.0060	0001.
TR	alfa33	alfa86	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa33	alfa87	0.0900	0.1800	0.0200	0.0080	0.0120	0001.
TR	alfa34	alfa88	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa35	alfa89	0.0400	0.0400	0.0210	0.0100	0.0180	0001.
TR	alfa89	alfa90	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa89	alfa91	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa89	alfa92	0.0800	0.1100	0.0500	0.0300	0.0120	0001.
TR	alfa36	alfa93	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa93	alfa94	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa94	alfa95	0.0400	0.0400	0.0210	0.0100	0.0180	0001.
TR	alfa95	alfa96	0.0800	0.1100	0.0450	0.0200	0.0370	0001.
TR	alfa37	alfa97	0.0800	0.1100	0.0500	0.0300	0.0120	0001.
TR	alfa37	alfa98	0.1100	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa98	alfa99	0.1100	0.1100	0.0060	0.0010	0.0060	0001.
TR	alfa98	alfa100	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa100	alfa101	0.0900	0.1800	0.0200	0.0080	0.0120	0001.
TR	alfa78	alfa79	0.0400	0.0400	0.0150	0.0120	0000.0000	0001.
TR	alfa71	alfa80	0.0800	0.1100	0.0100	0.0090	0000.0000	0001.
TR	alfa73	alfa439	0.0400	0.0400	0.0210	0.0100	0.00	0001.
TR	alfa81	alfa440	0.0800	0.1100	0.0450	0.0200	0.00	0001.
TR	alfa64	alfa441	0.0800	0.1100	0.0500	0.0300	0.00	0001.
TR	alfa101	alfa102	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa101	alfa103	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0120	0001.
TR	alfa61	alfa104	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.01	0001.
TR	alfa62	alfa105	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa65	alfa106	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa19	alfa107	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa11	alfa108	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa85	alfa109	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa86	alfa110	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa60	alfa111	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa60	alfa112	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa105	alfa113	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa103	alfa114	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa106	alfa115	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa115	alfa116	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa115	alfa117	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa107	alfa118	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa107	alfa119	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa104	alfa120	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa104	alfa121	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa110	alfa122	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa110	alfa123	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa109	alfa124	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.018	0001.
TR	alfa124	alfa125	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa122	alfa126	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.

TR	alfa59	alfa127	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa58	alfa128	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa58	alfa129	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa57	alfa130	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0	0001.
TR	alfa56	alfa131	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa55	alfa132	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00 0	001.
TR	alfa54	alfa133	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa53	alfa134	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.01	0001.
TR	alfa51	alfa135	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa52	alfa136	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa52	alfa137	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa50	alfa138	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.01	0001.
TR	alfa49	alfa139	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa48	alfa140	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.01	0001.
TR	alfa45	alfa141	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa45	alfa142	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa46	alfa143	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa47	alfa144	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa1	alfa145	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa2	alfa146	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa3	alfa147	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa44	alfa148	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa148	alfa149	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa149	alfa150	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa151	alfa152	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa150	alfa151	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa135	alfa153	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa144	alfa154	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0	0001.
TR	alfa142	alfa155	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa141	alfa156	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa143	alfa157	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa139	alfa158	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa40	alfa159	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0	0001.
TR	alfa41	alfa160	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa42	alfa161	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa43	alfa162	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa97	alfa163	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa87	alfa164	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa88	alfa165	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa74	alfa166	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa38	alfa167	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0120	0001.
TR	alfa2	alfa168	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa1	alfa169	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa140	alfa170	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa170	alfa171	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa171	alfa172	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa172	alfa173	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa173	alfa174	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa172	alfa175	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa161	alfa176	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa176	alfa177	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa177	alfa178	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa178	alfa179	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa178	alfa180	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa159	alfa181	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa181	alfa182	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa182	alfa183	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa160	alfa184	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.

TR	alfa163	alfa185	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa162	alfa186	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa186	alfa187	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa155	alfa188	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa154	alfa189	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.	0001.
TR	alfa169	alfa190	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa169	alfa191	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa190	alfa192	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa240	alfa193	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa244	alfa194	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa244	alfa195	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	001.
TR	alfa224	alfa196	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0	0001.
TR	alfa223	alfa197	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa121	alfa198	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa108	alfa199	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa108	alfa200	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa203	alfa201	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa203	alfa202	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa77	alfa203	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa205	alfa204	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa206	alfa205	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa207	alfa206	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa95	alfa207	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa209	alfa208	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa151	alfa209	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa212	alfa210	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa212	alfa211	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa79	alfa212	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa215	alfa213	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa215	alfa214	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa216	alfa215	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa67	alfa216	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa219	alfa217	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa219	alfa218	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0110	0001.
TR	alfa84	alfa219	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa222	alfa220	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0120	0001.
TR	alfa222	alfa221	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa248	alfa222	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0110	0001.
TR	alfa253	alfa223	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa253	alfa224	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa251	alfa225	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa228	alfa226	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa228	alfa227	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa252	alfa228	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa116	alfa229	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa231	alfa230	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa166	alfa231	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa123	alfa232	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa234	alfa233	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa235	alfa234	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa245	alfa235	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa237	alfa236	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa153	alfa237	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa239	alfa238	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa163	alfa239	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa141	alfa240	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa242	alfa241	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa138	alfa242	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.

TR	alfal36	alfa243	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfal37	alfa244	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal33	alfa245	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal32	alfa246	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal31	alfa247	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfal30	alfa248	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa250	alfa249	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal28	alfa250	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0110	0001.
TR	alfal27	alfa251	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal11	alfa252	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa254	alfa253	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal12	alfa254	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal20	alfa255	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa63	alfa256	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfal05	alfa257	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa21	alfa258	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa96	alfa259	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal46	alfa260	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa90	alfa261	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal0	alfa262	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0120	0001.
TR	alfal64	alfa263	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal14	alfa264	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa221	alfa265	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa261	alfa266	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa227	alfa267	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa226	alfa268	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfal89	alfa269	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa269	alfa270	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal45	alfa271	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal45	alfa272	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa61	alfa273	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfal14	alfa274	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa32	alfa275	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0	0001.
TR	alfa99	alfa276	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa276	alfa277	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa276	alfa278	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa278	alfa279	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa230	alfa280	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa80	alfa281	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0	0001.
TR	alfa224	alfa282	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa202	alfa283	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfal119	alfa284	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa197	alfa285	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa221	alfa286	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa240	alfa287	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0120	0001.
TR	alfal47	alfa288	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal40	alfa289	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa289	alfa290	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa290	alfa291	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0110	0001.
TR	alfa291	alfa292	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa291	alfa293	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa270	alfa294	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfal79	alfa295	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa295	alfa296	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal83	alfa297	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa297	alfa298	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfal67	alfa299	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa299	alfa300	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.



TR	alfa299	alfa301	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa301	alfa302	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa205	alfa303	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa303	alfa304	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa305	alfa305	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa261	alfa306	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa306	alfa307	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa306	alfa308	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa263	alfa309	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa309	alfa310	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa126	alfa311	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa210	alfa312	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa213	alfa313	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa313	alfa314	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0130	0001.
TR	alfa313	alfa315	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa315	alfa316	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa69	alfa317	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa117	alfa318	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0130	0001.
TR	alfa198	alfa319	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa247	alfa320	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa93	alfa321	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa75	alfa322	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa20	alfa323	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa84	alfa324	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa9	alfa325	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa7	alfa326	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa193	alfa327	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa214	alfa328	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0130	0001.
TR	alfa218	alfa329	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa218	alfa330	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa196	alfa331	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa331	alfa332	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa331	alfa333	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa233	alfa334	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0110	0001.
TR	alfa233	alfa335	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa272	alfa336	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa156	alfa337	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa337	alfa338	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa338	alfa339	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.01	0001.
TR	alfa338	alfa340	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa204	alfa341	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa91	alfa342	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa21	alfa343	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa79	alfa344	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.00	0001.
TR	alfa82	alfa345	0.0800	0.1100	0.0300	0.0150	0.0110	0001.
TR	alfa72	alfa346	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa220	alfa347	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa267	alfa348	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa197	alfa349	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa211	alfa350	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa264	alfa351	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa102	alfa352	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa158	alfa353	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa311	alfa354	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa311	alfa355	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa354	alfa356	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa353	alfa357	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa357	alfa358	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.

TR	alfa358	alfa359	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa357	alfa360	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0120	0001.
TR	alfa271	alfa361	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa155	alfa362	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa352	alfa363	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa259	alfa364	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa259	alfa365	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa266	alfa366	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0.0180 0001.
TR	alfa366	alfa367	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa367	alfa368	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa367	alfa369	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa232	alfa370	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa370	alfa371	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa370	alfa372	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa82	alfa373	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa244	alfa374	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0	0001.
TR	alfa244	alfa375	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa375	alfa376	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.018	00001.
TR	alfa223	alfa377	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa376	alfa378	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0120	0001.
TR	alfa223	alfa379	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa379	alfa380	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa203	alfa381	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa381	alfa382	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa77	alfa383	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa383	alfa384	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0	0001.
TR	alfa383	alfa385	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa207	alfa386	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa386	alfa387	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa337	alfa388	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa388	alfa389	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa389	alfa390	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0100	0001.
TR	alfa163	alfa391	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa391	alfa392	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa242	alfa393	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa372	alfa394	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.	0001.
TR	alfa372	alfa395	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0120	0001.
TR	alfa137	alfa396	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa137	alfa397	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa137	alfa398	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa398	alfa399	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa133	alfa400	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa133	alfa401	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa228	alfa402	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa401	alfa403	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa401	alfa404	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0080	0001.
TR	alfa254	alfa405	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa253	alfa406	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa107	alfa407	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa106	alfa408	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.01	0001.
TR	alfa170	alfa409	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa326	alfa410	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0	0001.
TR	alfa326	alfa411	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa411	alfa412	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa412	alfa413	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa412	alfa414	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa62	alfa415	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa283	alfa416	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.

TR	alfa287	alfa417	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa417	alfa418	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa418	alfa420	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa249	alfa421	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa249	alfa422	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa421	alfa423	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa282	alfa424	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa285	alfa425	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0	0001.
TR	alfa107	alfa426	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa317	alfa427	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa203	alfa428	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa150	alfa429	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa248	alfa430	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa254	alfa431	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa186	alfa432	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa220	alfa433	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa220	alfa434	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0	0001.
TR	alfa434	alfa435	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa434	alfa436	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.0180	0001.
TR	alfa435	alfa437	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
TR	alfa436	alfa438	0.0900	0.1200	0.0100	0.0070	0.00	0001.
CTR	aaaaaaaa	aaaaaaaa	####.####	####.####	####.####	####.####	####.####	####.####

C Datos de tramos

1 2 3 4 5 6 7  
 123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789

ENVIOS	RECEPCION	Impedancia			
		R_tramo	X_tramo		
		pu	pu		
CEN	aaaaaaaa	aaaaaaaa	####.####	####.####	
EN	alfa5	alfa11	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa10	alfa14	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa7	alfa16	0.0900	0.1200	0001.
EN	alfa67	alfa77	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa12	alfa20	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa19	alfa75	0.0900	0.1200	0001.
EN	alfa84	alfa117	0.0800	0.1100	0001.
EN	alfa96	alfa91	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa82	alfa126	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa165	alfa102	0.0900	0.1200	0001.
EN	alfa125	alfa76	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa152	alfa158	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa154	alfa135	0.0900	0.1200	0001.
EN	alfa160	alfa157	0.0800	0.1100	0001.
EN	alfa189	alfa187	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa253	alfa247	0.0900	0.1200	0001.
EN	alfa192	alfa99	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa251	alfa246	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa170	alfa139	0.0900	0.1200	0001.
EN	alfa75	alfa87	0.0800	0.1100	0001.
EN	alfa200	alfa209	0.0900	0.1200	0001.
EN	alfa261	alfa81	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa345	alfa234	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa219	alfa262	0.0900	0.1200	0001.
EN	alfa224	alfa225	0.0800	0.1100	0001.
EN	alfa282	alfa153	0.0400	0.0400	0001.
EN	alfa233	alfa239	0.0900	0.1200	0001.
EN	alfa288	alfa245	0.0400	0.0400	0001.

```

EN   alfa304   alfa331   0.0400   0.0400           0001.
EN   alfa281   alfa266   0.0900   0.1200 0001.    0001.
EN   alfa49    alfa95    0.0800   0.1100 0001.    0001.
cEN  aaaaaaaaa  aaaaaaaaa #####.### #.###.###
    
```

C Datos de Subestaciones

```

      1          2          3          4          5          6          7
123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789
    
```

```

      NOMBRE          Tension
                        pu
cSE  aaaaaaaaa #####.### #.###.###
cSE  Nombre S/E 0000.0000 0000.0000 000000.00000
SE   Subestac_1  1.02  0.          1.01
SE   Subestac_2  1.02  0.          1.
SE   Subestac_3  1.02  0.          1.03
SE   Subestac_4  1.02  0.          1.
SE   Subestac_5  1.02  0.          1.05
SE   Subestac_6  1.02  0.          1.
SE   Subestac_7  1.02  0.          1.02
SE   Subestac_8  1.02  0.          1.
SE   Subestac_9  1.02  0.          1.02
SE   Subestac10  1.02  0.          1.
SE   Subestac12  1.02  0.          0.97
SE   Subestac11  1.02  0.          1.
cSE  aaaaaaaaa #####.### #.###.###
    
```



---

# **GLOSARIO**

---



**Mayúsculas**

AT	Alta tensión.
BC	Beneficios de los consumidores.
BNE	Beneficio neto de la empresa distribuidora.
BNI	Beneficio neto individual (para el consumidor).
BSN	Beneficio social neto.
BT	Baja tensión.
$C_i$	Coste de compra de la energía en la $S/E_i$ .
Capac <sub>i</sub>	Potencia aparente nominal de la $S/E_i$ .
CV	Costes variables comprendidos por los pagos a realizar por compra de energía y por las multas por calidad de servicio.
CVI	Costes variables individuales.
CW	Costes asociados con la END.
END	Energía no distribuída.
ESTADO	Vector entero, al cual se le asigna un valor de 1 si el elemento leído está cerrado (si entra como una RAMA) y un 0 si el elemento conectado está abierto (si entra como un ENLACE).
F DIV(t)	Factor de diversidad.
I	Intensidad de corriente.
ICC	Inversiones en instalaciones de consumo.
ICN	Inversiones en instalaciones de red.
Ing	Ingresos de la empresa distribuidora.
INONC	Vector entero que almacena la localización de otro elemento conectado a NOMREC (estaría indicando los elementos conectados a un mismo nudo fuente).
INPA	Vector entero que almacena la localización del primer elemento del alimentador considerado.
INPNC	Vector entero que almacena la localización del primer elemento conectado al elemento dado por NOMREC (daría el primer elemento conectado abajo del considerado).
K	Constante de Boltzman.
KC	Instalaciones de consumo.
KN	Instalaciones de red.
LP	Pérdidas activas.
LQ	Pérdidas reactivas.
Max	Límite máximo
Mín	Límite mínimo
MT	Media tensión.
N	Variables de control de la explotación de la red.
NOMENV	Vector alfanumérico que almacena el nombre del nudo de envío o nudo fuente.
NOMREC	Vector alfanumérico que almacena el nombre del nudo de recepción o nudo carga.
NUANT	Vector entero que almacena la localización del elemento conectado a NOMENV (daría el elemento conectado arriba del considerado).
P	Potencia activa consumida.
P	Vector real que almacena la potencia activa requerida por la carga conectada en el nudo guardado en NOMREC.

---

$P_{ijk}$	Potencia activa recibida en el tramo aguas arriba del tramo $k$ del alimentador $j$ correspondiente a la $S/E_i$ .
PA	Potencia activa consumida por el alimentador.
PCONINT $_{ijk}$	Potencia interrumpible contratada.
PINT $_{ijk}$	Potencia interrumpida.
PR $_{ijk}$	Potencia activa recibida en el tramo $k$ del alimentador $j$ correspondiente a la $S/E_i$ .
PT $_i$	Potencia activa recibida en la $S/E_i$ .
Q	Potencia reactiva consumida.
Q	Vector real que almacena la potencia reactiva requerida por la carga conectada en el nudo guardado en NOMREC.
QA	Potencia reactiva consumida por el alimentador.
QC	Vector real que almacena la potencia reactiva generada en el nudo guardado en NOMREC.
QC $_{ijk}$	Potencia reactiva generada por el banco de condensadores colocado en el nodo $k$ del alimentador $j$ correspondiente a la $S/E_i$ .
QEND	Energía reactiva no distribuida.
QR $_{ijk}$	Potencia reactiva recibida en el tramo $k$ del alimentador $j$ correspondiente a la $S/E_i$ .
QRC $_{ijk}$	Potencia reactiva consumida en el nodo $k$ del alimentador $j$ correspondiente a la $S/E_i$ .
QT $_i$	Potencia reactiva recibida en la $S/E_i$ .
R	Restricciones de red.
R <sup>+</sup>	Valor límite de las restricciones de red.
S	Potencia aparente consumida.
S/E	Subestación AT.
SS $_{ijk}$	Potencia aparente acumulada en el tramo $k$ del alimentador $j$ correspondiente a la $S/E_i$ .
T	Temperatura.
T $_k$	Temperatura de enfriamiento en la iteración $k$ .
Tarifa $_{ijk}$	Tarifa en el nodo $k$ del alimentador $j$ correspondiente a la $S/E_i$ .
Term $_{ijk}$	Potencia aparente correspondiente al límite térmico del tramo $k$ del alimentador $j$ correspondiente a la $S/E_i$ .
V $_{ijk}$	Tensión en el nodo $k$ del alimentador $j$ correspondiente a la $S/E_i$ .
Z	Vector complejo que almacena la impedancia del tramo de línea conectado entre los nudos guardados en NOMENV y NOMREC.

### Minúsculas

a	Alimentador.
b	Factor.
c	Consumidor.
cp	Corto plazo.
e $_{ijk}$	Factor que tiene en cuenta la probabilidad de llegar al límite contractual para la interrupción dada.
fo	Función objetivo.
g (l)	Conjunto de elementos $g$ conectados al tramo aguas arriba $l$
h	Periodo de corto plazo (hora).
kVA	Kilovoltiamperios.
kVAr	Kilovoltiamperios reactivos.

KW	Kilovatios.
kWh	Kilovatios-hora.
l	Enlace.
$nal_i$	Número de alimentadores conectados a la S/E <sub>i</sub> .
nelem	Número de elementos.
netc	Número de etapas del banco de condensadores.
$nr_{ij}$	Número de ramas del alimentador j de la S/E <sub>i</sub> .
n	Número de nudos o de ramas de la red.
nS/E	Número de subestaciones AT/MT.
pu	Por unidad.
$r_{ijk}$	Resistencia del tramo k del alimentador j correspondiente a la S/E <sub>i</sub> .
reg	Regulación aceptada en pu.
t	Índice normalmente tomado para indicar el periodo de largo plazo.
$tacum_{ijk}$	Tiempo de interrupción acumulado en el nodo k del alimentador j correspondiente a la S/E <sub>i</sub> .
$tmax_{int_{ijk}}$	Tiempo máximo permitido de interrupción en el punto.
$t_{int}^+$	Tiempo de interrupción.
$tt_i$	Toma del transformador de la S/E <sub>i</sub> .
$x_{ijk}$	Reactancia del tramo k del alimentador j correspondiente a la S/E <sub>i</sub> .

### Griegas

$\Delta t$	Tiempo de la interrupción dada.
$\Pi$	Multiplicador de Lagrange asociado con las restricciones de red.
$\alpha(T_k)$	Coefficiente de reducción de temperatura para la iteración k.
$\delta$	Tarifa pagada por la distribuidora por potencia reactiva.
$\rho$	Tarifa pagada por el consumidor por potencia activa.
$\sigma$	Tarifa pagada por el consumidor por potencia reactiva.
$\theta$	Tarifa pagada por la distribuidora por potencia activa.
$\xi$	Multiplicador de Lagrange asociado con las restricciones del consumo.



---

## **BIBLIOGRAFÍA**

---



- [Alvarez-93] C. Alvarez y A. Gabaldon, "Distribution Load Modelling I: Physically Based Load Models", Curso de EES-UETP, Distribution Automation, Load Management and Quality of Supply, Pueblo Acantilado, Alicante, España, 1993.
- [Augugliaro-91] A. Augugliaro, L. Dusonchet y S. Mangione, "Optimal Re-configuration of Distribution Network for Loss Reduction Using Non-linear Programming", ETEP, vol. 1, Nº 6, pp 317-323, November/December 1991.
- [Baldick-90] R. Baldick, y F. F. Wu, "Efficient Integer Optimization Algorithms for Optimal Coordination of Capacitors and Regulators", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, pp 805-812, Agosto 1990.
- [Baldick-90-2] R. Baldick, Discusión de: V. Glamocanin, "Optimal Loss Reduction of Distribution Networks", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, pp 774-781, Agosto 1990.
- [Baldick-91] R. Baldick, y F. F. Wu, "Approximation Formulas for the Distribution System: the Loss Function and Voltage Dependence", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 6, pp 252-259, Enero 1991.
- [Baran-89] M. E. Baran, y F. F. Wu, "Optimum Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, pp 735-743, Enero 1989.
- [Baughman-93] M. L. Baughman, S. N. Siddiqi y J. Zarnikau, "Advanced Pricing in Electrical Systems", The University of Texas at Austin, Febrero 1993.
- [Beguelin-94] A. Beguelin, J. J. Dongarra, G. A. Geist, R. Mancheck y V. S. Sunderam, "HeNCE: A User's Guide Version 2.0", Junio 15, 1994.
- [Borozan-95] V. Borozan, D. Rajicic y R. Ackovsky, "Improved Method for Loss Minimization in Distribution Networks", IEEE Winter Meeting, Febrero 1995.
-

- [Carrillo-84] G. Carrillo Caicedo, "Introducción al Análisis de los Sistemas de Potencia", Publicaciones UIS, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1984.
- [Carrillo-94] G. Carrillo Caicedo y J. I. Pérez-Arriaga. "Optimal Reconfiguration of Distribution Networks with a Multiplicity of Objective Functions". Working Paper IIT-94-014, Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España.
- [Carrillo-95] G. Carrillo\_Caicedo y J. I. Pérez-Arriaga, "Optimal Reconfiguration of Distribution Networks for a Diversity of Regulatory Frameworks", submitted to the Stockholm Power Tech, Junio, 1995.
- [Carrillo-95-2] G. Carrillo Caicedo e I. J. Pérez Arriaga, "Explotación Óptima de Redes de Distribución en Entornos de competencia", Presentada a las IV Jornadas Luso-Españolas, Oporto, Julio, 1995.
- [Castro-90] C. Castro y A. A. Watanabe, "An Efficient Reconfiguration Algorithm for Loss Reduction of Distribution Systems", Electric Power Systems Research, 19(1990), pp. 137-144, 1990.
- [Céspedes-85] R. Céspedes, y R. A. Gallego, "Optimización de la Configuración de Redes de Distribución para su Operación Económica", X Congreso de la Asociación Colombiana de Electricistas, Mecánicos y Ramas Afines, Cali, 1985.
- [Céspedes-90] R. Céspedes, "New Method for the Analysis of Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, pp. 391-396, January 1990.
- [CIGRE-93] CIGRE TF 38-06-06, "Artificial Neural Networks for Power Systems: A Literature Survey", Engineering Intelligent Systems, vol. 1, No. 3, pp. 133-158, Diciembre 1993.
- [Civanlar-85] S. Civanlar, y J. J. Grainger, "Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators: Parts I, II, III", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp 3278-3297, Noviembre 1985.
-

- [Civanlar-88] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Yin, y S. H. Lee, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 3, pp 1217-1223, Julio 1988.
- [CNE-94] Unidad de Planeación Minero-Energética, "Plan energético Nacional", Publicaciones del Ministerio de Minas y Energía de la República de Colombia. Mayo 1994.
- [Cook-61] R. F. Cook, "Optimizing the Application of Shunt Capacitors for Reactive Volt-Ampere Control and Loss Reduction", *AIEE Transactions Part III*, vol. 80, pp 430-444, Ag. 1961.
- [Chang-94] H.Ch. Chang y Ch. Ch. Kuo, "Network Reconfiguration in Distribution Systems using Simulated Annealing", *Electric Power Systems Research*, 29(1994), Mayo 1994.
- [Chen-84] M. S. Chen y R. R. Shoults, "The Effects of Reduced Voltage on the Operation and Efficiency of Electric Systems", EPRI EL-3591, 1984.
- [Cherkaoui-92] S. R. Cherkaoui, "Methodes Heuristiques pour la recherche de configurations Optimales d'un Reseau Electrique de Distribution", These # 1058, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suiza, 1992.
- [Chiang-90] H. D. Chiang, y R. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol 5, No. 3, Julio 1990.
- [De Cuadra-91] F. de Cuadra, "El Problema General de la Optimización del Diseño por Ordenador: Aplicación de Técnicas de Ingeniería del Conocimiento", Tesis Doctoral, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España, 1990.
- [Durán-68] H. Durán, "Optimum Number, Location, and Size of Shunt Capacitors in Radial Distribution Feeders: A Dynamic Programming Approach", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 87, pp 1769-1774, Septiembre 1968.
-

- [Fawzi-83] T. H. Fawzi, S. M. El-Sobki, y M. A. Abdel-Halim, "A New Approach for the Application of Shunt Capacitors to the Primary Distribution Feeders", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, pp 10-13, Enero 1983.
- [Ford-62] L. R. Ford y D. R. Fulkerson, "Flows in Networks", Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 1962.
- [Gabaldón-92] A. Gabaldón Marín, "Modelos Estocásticos de Carga para la Gestión de Demanda en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 1992.
- [Geist-94] G. A. Geist, A. Beguelin, W. Liang, R. Mancheck y V. S. Sunderam, "PVM: User's Guide and Reference Manual", ORNL-DE-AC05-84OR21400, Oak Ridge, Tennessee, 1994.
- [Glamocanin-90] V. Glamocanin, "Optimal Loss Reduction of Distribution Networks", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 5, pp 774-781, Agosto 1990.
- [Goswami-91] S. K. Goswami y S. K. Basu, "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, pp 345-352, Enero 1981.
- [Grainger-81] J. J. Grainger, y S. H. Lee, "Optimum Size and Location of Shunt Capacitors for Reduction of Losses on Distribution Feeders", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 100, pp 1105-1118, 1991.
- [Grainger-82] J. J. Grainger, y S. H. Lee, "Capacity Release by Shunt Capacitor Placement on Distribution Feeders: A New Voltage Dependent Model", 1236-1244, Mayo 1982.
- [Grainger-83] J. J. Grainger, S. Civanlar, y S. H. Lee, "Optimum Design and Control Scheme for Continuous Capacitive Compensation of Distribution Feeders on Distribution Feeders", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, pp 3271-3278, Octubre 1983.
-

- [Hasselfield-90] C. W. Hasselfield, P. Wilson, L. Penner, M. Lau y A. M. Gole, "An Automated Method for Least Cost Distribution Planning", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 5, No. 2, pp 1188-1194, Abril 1990.
- [Handschin-93] E. Handschin, "Load Modelling and Short Term Forecasting", Curso de EES-UETP, Distribution Automation, Load Management and Quality of Supply, Pueblo Acanilado, Alicante, España, 1993.
- [Harnisch-91] I. A. Harnisch, "Reconfiguración de Sistemas Eléctricos de Distribución", Tesis de Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1991.
- [Holland-75] J. Y. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [Horowitz-89] P. Horowitz y W. Hill, "The Art of Electronics", Cambridge University Press, 2ª Edición, 1989.
- [Hsu-93] Y. Y. Hsu, Y. Jwo-Hwu, S. S. Liu, Y. W. Chen, H. C. Feng y Y. M. Lee, "Transformer and Feeder Load Balancing using a Heuristic Search Approach", *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 8, No. 1, 1993.
- [Jung-93] H. Kim, Y. Ko y K. Jung, "Artificial Neural-Network Based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Distribution Systems ", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, No. 3, pp 1356-1966, Julio 1993.
- [Kim-93] K. Jung, H. Kim y Y. Ko, "Network Reconfiguration Algorithm for Automated Distribution Systems Based on Artificial Intelligence Approach", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, pp 1933-1941, Oct. 1993.
- [Kärenlampi-93] M. Kärenlampi, P. Järventausta, P. Verho, y J. Partanen, "Load Modelling II: Load Curve Based Load Modelling and Forecasting", Curso de EES-UETP, Distribution Automation, Load Management and Quality of Supply, Pueblo Acanilado, Alicante, España, 1993.
- [Lakervi-89] E. Lakervi, y E. J. Holmes, "Electricity Distribution Network Design", Peter Peregrinus Ltd, London, 1989.
-

- [Latorre-93] G. Latorre, "Modelos Estáticos para la Planificación a Largo Plazo de la red de Transporte de Energía Eléctrica", Tesis Doctoral. Universidad Pontificia Comillas, 1993.
- [Lee-81] S. H. Lee, y J. J. Grainger, "Optimum Placement of Fixed and Switched Capacitors on Primary Distribution Feeders", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 100, pp 345-352, Enero 1981.
- [Lee-94] T. E. Lee, M. Y. Chò y C. S. Chen, "Distribution System Reconfiguration to Reduce Resistive Losses ", Electric Power Systems Research, 30(1994), pp 25-33.
- [Lin-87] C. E. Lin, Y. W. Huang y C. L. Huang, "Distribution System load Flow Calculation with Microcomputer Application", Electric Power Systems Research, 13(1987), pp 139-145.
- [Lo-93] K. L. Lo, y S. P. Zhu, "Wheeling and Marginal Wheeling Rates: Theory and Case Study Results", Electric Power Systems Research, 27(1993), pp 11-26.
- [Luenberger-73] D. G. Luenberger, "Introduction to Linear and Nonlinear Programming", addison-Wesley, 1973.
- [Marín-92] F. J. Marín, F. García y F. Sandoval, "Algoritmos Genéticos: Una estrategia para la Búsqueda y la Optimización", Informática y Automática, Vol 25, Nos. 3 y 4, pp 5-15, Noviembre 1992.
- [Merlin-75] A. Merlin, y H. Back, "Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration for an Urban Power Distribution System", Proc. of PSCC, Cambridge, 1975.
- [Mijuskovic-92] N. A. Mijuskovic, "Optimal Operation Planning of Distribution Systems Considering Security Constraints", Electric Power and Energy Systems, vol. 14, No. 6, pp 383-386, Diciembre 1992.
-

- [Miranda-94] V. Miranda, J. V. Ranito y L. M. Proença, "Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning", 1994 IEEE Summer Power Meeting, 94 WM 229-5 PWRS, Enero 1994.
- [Morelato-89] A. L. Morelato y A. Monticelli, "Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, pp 2235-2241, Octubre 1989.
- [Mortensen-90] R. E. Mortensen y K. P. Haggerty, "Dynamics of Heating and Cooling Loads: Models, Simulation and Actual Utility Data", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, pp 252-259, Febrero 1990.
- [Muñoz-94] A. Muñoz. "Librería de Funciones para el Entrenamiento y Evaluación de Perceptrones Multicapa". Informe Técnico IIT-94-015, Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España.
- [Murphy-93] L. Murphy, R. J. Kaye y F. F. Wu, "Distributed Spot Pricing in Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, pp 311-317, Febrero 1994.
- [Nara-91] K. Nara, y M. Kitagawa, "Distribution Systems Loss Minimum Re-configuration by Simulated Annealing Method", IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 1991.
- [Nara-92] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, y T. Ishihara, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Re-configuration", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, pp 1044-1051, August 1992.
- [Neagle-56] N. M. Neagle, y D. R. Samson, "Loss Reduction from Capacitors Installed", AIEE Transactions Part III, vol. 75, pp 950-959, Octubre 1956.
- [Peponis-95] G. J. Peponis, M. P. Papadopoulos y N. D. Hatziargyriou, "Optimal Operation of Distribution Networks", IEEE Winter Meeting, Febrero 1995.
-

- [Peña-94] C. I. Peña de Carrillo, "Procesamiento Paralelo Aplicado a la Reconfiguración Óptima de Redes de Distribución", Artículo de la Memoria E.U.T.I., IIT-813, Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España.
- [Pérez-Arriaga-91] J. I. Pérez-Arriaga, "A Conceptual Model for Pricing Analysis of Transmission Services", Working Paper IIT-91-006, Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas, 1991.
- [Prieto-94] F. Prieto, Curso "Simulación y Optimización de Procesos", Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III, Nov-Dic 1994, Leganés, Madrid.
- [Ramírez-92] I. J. Ramírez-Rosado y R. N. Adams, "Optimal Design of electric Energy Distribution Systems: Multiobjective Mathematical Modelling", Modelling Identification and Control--11th International Conference, Innsbruck, Febrero 1992.
- [Roldán-93] C. Roldán, " Efficiency Management I: Losses Evaluation and Management", Curso de EES-UETP, Distribution Automation, Load Management and Quality of Supply, Pueblo Acanilado, Alicante, España, 1993.
- [Ribeiro-94] J. L. Ribeiro Filho, P. H. Treleaven y Cesare Alippi "Genetic-Algorithm Programming Environments", Computer, pp. 28-43, Junio 1994.
- [Rivier-90] M. Rivier, J. I. Pérez-Arriaga y G. Luengo "JUANAC: A Model for Computation of Spot Prices in Interconnected Power Systems", 10 PSCC Conference, Graz, Austria, Agosto 1990.
- [Rivier-91] M. Rivier, y J. I. Pérez-Arriaga, "Cost Allocation of Transmission Services", Working Paper IIT-91-007, Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas; 1991.
- [Ross-80] D. W. Ross, M. Carson y A. I. Cohen, "Development of Advanced Method for Planning Electric Energy Distribution Systems", U.S. DOE Report, ET-78-C.03-1845, Febrero 1980.
-

- [Roytelman-93] I. Roytelman y S. M. Shahidehpour, "Practical Aspects of Distribution Automation in Normal and Emergency Conditions", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, Octubre 1993.
- [Schweppe-85] F. C. Schweppe, M. C. Caramanis, y R. D. Tabors, "Evaluation of Spot Price Based Electricity Rates", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp 1644-1655, Julio 1985.
- [Schweppe-88] F. C. Schweppe, "Mandatory wheeling: A Framework for Discussion", IEEE Summer Meeting, Julio 1988.
- [Shirmohammadi-89] D. Shirmohammadi, y H. W. Hong, "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, pp 1492-1498, Abril 1989.
- [Stagg-68] Stagg y El Abiad, "Computer Applications of Modern Power Systems" Mc Graw Hill Book Company, New York 1968.
- [Taylor-90] T. Taylor, y D. Lubkeman, "Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, pp 239-246, Enero 1990.
- [Wagner-75] H. M. Wagner, "Principles of Operations Research with Applications to Managerial Decisions", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Estados Unidos, 1975.
- [Wood-84] A. J. Wood y B. F. Wollenberg, "Power, Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, 1984.
-

