

SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO CON PÉRDIDAS
MEDIANTE NEGOCIACIONES ITERATIVAS ENTRE LOS AGENTES
DEL MERCADO

CARLOS JULIO CAICEDO SÁNCHEZ

DIEGO QUINTERO HERRERA

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA

2014

SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO CON PÉRDIDAS
MEDIANTE NEGOCIACIONES ITERATIVAS ENTRE LOS AGENTES
DEL MERCADO

CARLOS JULIO CAICEDO SÁNCHEZ

DIEGO QUINTERO HERRERA

*Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Eléctricista*

Director

IVÁN DAVID SERNA SUÁREZ
Magister en Ingeniería Eléctrica

Codirector

GILBERTO CARRILLO CAICEDO
Doctor Ingeniero Industrial.

Codirector

GABRIEL ORDOÑEZ PLATA
Doctor Ingeniero Eléctricista.

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA

2014

Dedicatoria.

A mi familia que es el motor de mi vida, en especial a mi señora madre Clara Inés Sánchez, mi tío José Joaquín Sánchez y mi abuela Arminda Flores de Sánchez de los que he recibido apoyo, consejería y un inmenso e ilimitado amor. A mi novia Aida por su cariño, amor y lindo apoyo incondicional. Y por último pero no menos importante a mis amigos Valdi, Jota, Kate, Diego, Aura y muchos más con los que pedaleamos juntos este pequeño tramo del camino de nuestras vidas.

Carlos J. Caicedo Sánchez.

A mi familia, mi novia y amigos, quienes han sido testigos silenciosos del esfuerzo y la dedicación que he tenido durante estos años en los que realice la carrera y se han encargado de darme ánimo y fortaleza día a día.

Diego Quintero H.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este proyecto de investigación no hubiese sido posible sin la colaboración incondicional de muchas personas que con su aporte ayudaron a que este proyecto fuera terminado con éxito.

En primer lugar a nuestro director de proyecto el Ingeniero Iván David Serna Suárez por su excelente dirección, asesoría, respaldo, críticas , aportes , confianza y compromiso durante el desarrollo del proyecto.

A los docentes de la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E^3T), por su acogida y el apoyo recibido durante este recorrido de aprendizaje, aportaron su conocimiento y rectitud para formarnos como profesionales íntegros.

A nuestros compañeros y amigos con los cuales compartimos largas jornadas de estudio, gracias por su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos.

A todos ellos muchas gracias.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
<hr/>	
1. SOLUCIÓN AL FLUJO DE POTENCIA DESCENTRALIZADO	18
<hr/>	
1.1. SOLUCIÓN DESCENTRALIZADA	19
1.1.1. Descripción del problema	19
1.2. CIRCUITOS ELÉCTRICOS	20
1.2.1. Descripción del problema	20
1.2.2. El problema del flujo mínimo en circuitos eléctricos	21
1.3. SISTEMAS DE POTENCIA	24
1.3.1. Descripción del problema	25
1.3.2. Metodología del Gauss Seidel descentralizado	26
1.3.3. Implementación Gauss-Seidel descentralizado en una plataforma multiagente	31
2. SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO SIN Y CON PÉRDIDAS	36
<hr/>	
2.1. COSTOS DE LA ENERGÍA	37
2.1.1. Descripción del problema	37
2.2. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA SIN PÉRDIDAS	39
2.2.1. Descripción del problema	39
2.2.2. Metodología para la solución del despacho sin pérdidas	40
2.2.3. Implementación del despacho sin pérdidas en el MAS	44
2.3. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA CON PÉRDIDAS	48
2.3.1. Descripción del problema	49
2.3.2. Metodología para la solución del despacho con pérdidas	51
2.3.3. Implementación del despacho con pérdidas en el MAS	55
3. RESULTADOS	61
<hr/>	
3.1. SOLUCIÓN PARA EL FLUJO DESCENTRALIZADO	62
3.2. SOLUCIÓN AL DESPACHO DESCENTRALIZADO SIN PÉRDIDAS	64

3.3. SOLUCIÓN AL DESPACHO DESCENTRALIZADO CON PÉRDIDAS	65
3.4. TIEMPO DE CÓMPUTO	72
4. CONCLUSIONES	73
<hr/>	
BIBLIOGRAFÍA	75
<hr/>	
ANEXOS	76
<hr/>	

LISTA DE FIGURAS

1.1. Descomposición simple (BOYD, 2008)	19
1.2. Descomposición con tres subsistemas (BOYD, 2008)	20
1.3. Sistema conformado por 5 nodos y 7 líneas BOYD (2008)	22
1.4. Diagrama de flujo para el procedimiento de solución de flujos mínimos en un circuito eléctrico	24
1.5. LCK en una barra PV	26
1.6. Flujo de potencia activa en el nodo i	28
1.7. Flujo de potencia reactiva en el nodo i	28
1.8. Interacción entre los agentes de nodo	34
1.9. Sistema multiagente en JASON. A la izquierda se encuentra parte de la estructura del código en JASON del agente nodo. Y a la derecha de la consola se muestran los resultados del flujo de cargas implementado para el sistema de 5 barras.	35
2.1. Curva entrada-salida por una unidad generada de combustible fósil. Adaptada de GRAINGER (1996)	38
2.2. Relación entre los agentes de despacho	43
2.3. Interacción entre los agentes del despacho para el sistema de 5 barras. Se muestra la comunicación entre los agentes.	44
2.4. Diagrama de flujo agente C	47
2.5. Diagrama de flujo del agente G	47
2.6. Interacción entre los agentes p , g y c para un despacho sin pérdidas	48
2.7. Diagrama de flujo del despacho con pérdidas	55
2.8. Interacciones entre todos los agentes involucrados en el problema de despacho con pérdidas	58
2.9. Sistema multiagente en JASON. A la izquierda se puede observar parte de la estructura del código de JASON en el agente c y a la derecha la solución al sistema de 5 barras.	60

3.1. Gráficas de las potencias generadas en JASON y Power World. . .	63
3.2. CMCP en el sistema de 5 barras	66
3.3. Distribución de potencias activa para el sistema de 5 barras	66
3.4. Función de costos para las plantas del sistema de 5 barras	67
3.5. Potencia de pérdidas en el sistema de 5 barras	67
3.6. Distribución de potencias para el despacho resuelto de manera Centralizada y Descentralizada	68
3.7. Costos incrementales para el sistema de 26 barras. Donde los CMCP al igual que para el caso del sistema de 5 barras tienden a un mismo valor	69
3.8. Costos en el despacho con pérdidas para el sistema de 26 barras	70
3.9. Resultados del sistema de 5 barras forzando límites de potencia.	71
A.1. Sistema de potencia de 5 barras	77
A.2. Esquema del sistema de potencia de 26 barras	79
C.1. Comportamiento agente gerente	87
C.2. Comportamiento agente controlador	88
C.3. Comportamiento agente p	88

LISTA DE TABLAS

1.1. Resumen del problema de flujos de potencia	26
1.2. Algoritmo de flujos de potencia implementado en el proyecto	31
2.1. Distribución de potencias activas en un sistema con dos plantas de energía	40
2.2. Algoritmo para un despacho sin pérdidas	43
2.3. Algoritmo del despacho con pérdidas	54
2.4. Interacción entre el agente p y el ambiente para el conocimiento de los costos marginales	56
3.1. Resultados del flujo de cargas 5 barras en JASON.	62
3.2. Tensión y potencia generada para el sistema de potencia de 26 barras	63
3.3. Distribución de las potencias, costos marginales y costos totales para el sistema de 5 barras	64
3.4. Datos del despacho sin pérdidas para el sistema de 26 barras	65
3.5. Parámetros generales del sistema de 5 barras en el despacho con pérdidas	68
3.6. Parámetros generales del sistema de 26 barras en el despacho con pérdidas	70
3.7. Tiempo de cómputo para el sistema de 5 barras	72
A.1. Resultados del sistema de 5 barras	78
A.2. Datos de salida para el flujo centralizado del sistema de potencia de 26 barras .	80
B.1. Resultados del sistema de 5 barras	82
B.2. Resultados del sistema de potencia de 26 barras	83

ANEXOS

ANEXO A. SOLUCIÓN AL FLUJO DE POTENCIA DE FORMA CENTRALIZADA	77
ANEXO B. SOLUCIÓN AL DESPACHO DE POTENCIA DE FORMA CENTRALIZADA	81
ANEXO C. CONCEPTOS BÁSICOS EN JASON	84

RESUMEN

TÍTULO:

SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO CON PÉRDIDAS MEDIANTE NEGOCIACIONES ITERATIVAS ENTRE LOS AGENTES DEL MERCADO. ¹

AUTORES:

CARLOS JULIO CAICEDO SÁNCHEZ

DIEGO QUINTERO HERRERA²

PALABRAS CLAVE:

Flujo de carga descentralizado, Despacho económico sin pérdidas, Despacho económico con pérdidas, Sistema multiagente (MAS)

DESCRIPCIÓN:

Los agentes inteligentes son una fuerte base para controlar el sistema dinámico de las microredes. La tecnología del sistema multiagente (MAS) ofrece un rango amplio de aplicaciones en los sistemas de potencia como el monitoreo de los sistemas de potencia y la operación de mercados de energía.

Para realizar el despacho tradicional de energía se requieren altos volúmenes de información controlados centralmente. Este trabajo propone el desarrollo de un algoritmo en forma descentralizada que calcula el precio de la energía para un despacho con pérdidas, generando activa participación por los integrantes del mercado. El algoritmo es implementado en una plataforma multiagente (MAS) que provee un enfoque descentralizado para los cálculos. El flujo de cargas es calculado a través de un algoritmo distribuido del Gauss Seidel, y un despacho sin pérdidas es implementado a través del contrat net protocol que ayuda a igualar todos los costos incrementales de generación. El cálculo del despacho con pérdidas toma como estimación inicial un despacho sin pérdidas y su respectiva solución del flujo de potencia, luego a través de los coeficientes de pérdida del sistema calcula la penalización para cada costo incremental, que tiene que ser igual al final del algoritmo. Debido a la dependencia de los sistemas con pérdidas para todos los parámetros de los sistemas de potencia el cálculo del despacho con pérdidas es parcialmente descentralizado. Futuros trabajos tienen como objetivo poner en práctica este tipo de métodos para la gestión de la generación distribuida en un sistema de distribución de energía y aplicar métodos más sofisticados (como las subastas) para asignar los recursos energéticos locales.

¹Trabajo de grado.

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
Director: Iván David Serna Suárez . Codirector: Gilberto Carrillo Caicedo. Codirector: Gabriel Ordoñez Plata.

ABSTRACT

TITLE:

SOLUTION OF THE ECONOMIC DISPATCH WITH LOSSES THROUGH ITERATIVE NEGOTIATIONS BETWEEN MARKET AGENTS³

AUTHORS:

CARLOS JULIO CAICEDO SÁNCHEZ

DIEGO QUINTERO HERRERA⁴

KEY WORDS:

Decentralized power flow, Lossless economic dispatch, Economic dispatch with losses, Multi-Agent Systems (MAS)

DESCRIPTION:

Intelligent agents are a strong basis for controlling the dynamic that characterized the microgrids. Multi-agent-system(MAS) technology offers a wide range of applications in the power system such as monitoring power system (CAI, 2012) and the operation of the energy market (DIMEAS, 2004).

To solve a traditional dispatch with losses its required high volumes of information that are centrally controlled. This work proposes the development of a decentralized algorithm that calculates the price of energy for a dispatch with losses, generating active participation by market participants. The algorithm is implemented in a multi-agent-system platform (MAS) that provides a decentralized environment for calculations. Power flow is calculated through a distributed Gauss-Seidel algorithm, and a lossless dispatch is implemented through a contract net protocol which helps to equals all generator incremental costs. The computation of the dispatch with losses takes as an initial guess a lossless dispatch and its respective power flow solution and then through the loss coefficients of the system calculates the penalization for each incremental cost, which have to be equal at the end of the algorithm. Due to the dependency of system losses to all power system parameters the calculation of the dispatch with losses is partially decentralized. Future works aim to implement this kind of methods for distributed generation management in a power distribution system and to implement most sophisticated methods (like auctions) to allocate local energy resources.

³Research work.

⁴Faculty of Physical-Mechanic Engieneering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Advisor: Iván David Serna Suárez. Co-advisor: Gilberto Carrillo Caicedo. Co-advisor: Gabriel Ordoñez Plata.

INTRODUCCIÓN

Los agentes inteligentes son una base fuerte para controlar la dinámica en la que se caracterizan las microrredes. La tecnología MAS ofrece una amplia gama de aplicaciones en el sistema de potencia tales como la supervisión del sistema de energía (CAI, 2012), la operación del mercado energético (DIMEAS, 2004) y flujo de potencia óptimo, entre otros. Los agentes basan su estructura en el modelo BDI (*Believe, Desires and Intentions*). Para entender mejor el modelo BDI se debe romper con el paradigma de programación lineal y tratar a los programas computacionales como si tuviera un estado mental. De los múltiples lenguajes que existen para realizar la programación de sistemas multiagentes, AgentSpeak(L) ofrece una sintaxis más clara y cercana a el paradigma BDI. JASON es un lenguaje de programación que extiende algunas características de AgentSpeak(L), conservando su sintaxis. Porque esto permite que la curva de aprendizaje sea menos abrupta en cuanto al desarrollo de plataformas multiagente (MAS) se refiere, se ha elegido este lenguaje para el desarrollo de las aplicaciones en el presente trabajo.

Para la realización de este proyecto se utilizó esta tecnología del MAS para aprovechar la naturaleza descentralizada de los sistemas de generación distribuida, que son las nuevas alternativas para satisfacer una demanda cada vez mayor. La tecnología DG y las fuentes de energía renovables, especialmente han desempeñado un papel vital en la industria de la energía moderna, debido a los beneficios ambientales y de costos.

El principal foco de este proyecto es desarrollar un algoritmo de manera descentralizada que calcule el precio de la energía de manera eficiente y económica para un despacho con pérdidas, generando una participación activa por parte de los participantes del mercado, teniendo cada participante influencia importante sobre el costo global de la energía.

La organización del trabajo es la siguiente. En el primer capítulo se aborda el flujo descentralizado estableciendo la filosofía de desarrollo y exponiendo esta desde los circuitos eléctricos, pasando por los sistemas de potencia y terminando en la implementación en la plataforma multiagente (MAS). El segundo capítulo aborda el despacho descentralizado sin y con pérdidas dividido en 3 secciones, la primera sección se establece los tipos de mercados presentes en el despacho y los costos asociados a la energía, la segunda y tercera sección abordan el tema de operación económica sin y con pérdidas respectivamente, para cada una de estas secciones se establece la descripción del problema, la filosofía de desarrollo y la implementación en la plataforma MAS donde se explica por medio de graficas el flujo de datos el comportamiento de los agentes. El tercer y último capítulo muestra resultados de dos sistemas de potencia implementados en el MAS, donde se evidencia la evolución del algoritmo con el paso de las iteraciones para los diferentes parámetros de interés.

CAPÍTULO 1

SOLUCIÓN AL FLUJO DE POTENCIA DESCENTRALIZADO

Los flujos de carga son temas introductorios a la temática de los cursos de sistemas de potencia. Durante el desarrollo de esta materia se conocen distintos métodos para solucionar un problema de flujos de carga, entre estos métodos numéricos son muy conocidos dos, el Newton Raphson y el Gauss Seidel. En este capítulo se presenta la metodología utilizada para resolver flujos de potencia de manera descentralizada. Los agentes involucrados solo necesitarán información local, y el flujo será resuelto de manera parcial por cada uno de ellos.

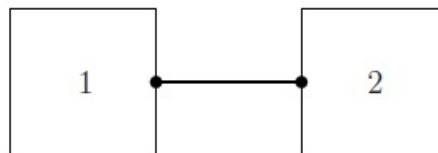
El capítulo está conformado de la siguiente manera. Inicialmente se explica la filosofía de la solución descentralizada y las metodologías relacionadas. Posteriormente, se resuelve con base en esta filosofía el problema de flujos mínimos, y se hace la analogía con los circuitos eléctricos utilizando un método de descomposición (BOYD, 2008). En la sección 2 se abordan los sistemas de potencia, principalmente se hace una descripción de los tipos de barras y de los métodos numéricos para su solución. Seguidamente en la sección 2.2 se describe el proceso del algoritmo implementado para resolver el flujo de cargas de manera descentralizada. Y al final de este capítulo se encuentra la implementación de 2 sistemas de potencia, de 5 y 26 barras, en la plataforma multiagente JASON utilizando la filosofía mencionada.

1.1 SOLUCIÓN DESCENTRALIZADA

El concepto de descentralización se basa en la descomposición en partes de un sistema (subsistemas), con el fin de redistribuir un problema. Cada subsistema tiene acceso a información local y estas partes del sistema pueden estar enlazadas o no (BOYD, 2008). En este proyecto se utiliza este concepto enfocado en la parte matemática para resolver un problema de optimización. Algunos de los métodos que permiten la solución de un problema descentralizado consisten en las técnicas de descomposición simple y descomposición dual. A continuación se presenta una descripción más detallada del método de la descomposición y su relación con un problema descentralizado.

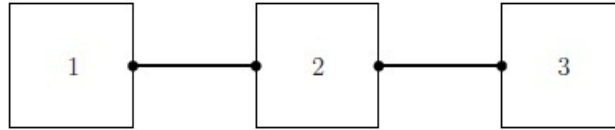
1.1.1 Descripción del problema Si se describe el caso de un sistema, que puede ser dividido como mínimo en su forma más simple, en dos subsistemas, se empezaría por hablar de la forma más sencilla de estructurar la base del concepto de descomposición (BOYD, 2008). En la Figura 1.1, los subsistemas están representados por cajas, y cada uno tiene asociadas unas variables locales. Algunas de estas variables pueden ser solo propias (aparecer solo en un subsistema en particular) o públicas, o variables acopladas con otros subsistemas. Las conexiones entre estos determinan si existen o no variables públicas que pueden ser utilizados en un subsistema u otro. Ahora bien, si se tiene un problema en un sistema se puede fraccionar este problema y dividirlo en problemas más pequeños. La filosofía de la solución descentralizada se enfoca en que cada subsistema resuelva esos pequeños problemas.

Figura 1.1.: Descomposición simple (BOYD, 2008)



En la Figura 1.2 se muestra otra estructura de descomposición con tres subsistemas, llamados 1, 2 y 3. Este problema consiste en 3 sub-problemas, con algunos acoplamientos entre 1 y 2, y otro entre 2 y 3. Se puede asociar el siguiente problema como:

Figura 1.2.: Descomposición con tres subsistemas (BOYD, 2008)



$$\text{minimizar } f_1(x_1, y_1) + f_2(x_2, y_2, y_3) + f_3(x_3, y_4) \quad (1.1)$$

$$\text{Sujeto a } y_1 = y_2, y_3 = y_4 \quad (1.2)$$

Para la Figura 1.2 el subsistema 1 tiene una variable local x_1 y una pública y_1 . El subsistema 2 tiene una variable local x_2 , y una pública y_2 y y_3 . Y por último el subsistema 3 tiene una variable local x_3 , y una variable pública y_4 . El principio para resolver este problema de optimización consiste en escoger primero un método de descomposición. Para nuestro caso el método utilizado es la descomposición dual, en el cual se plantea que los subsistemas tienen acceso a las variables públicas de la red adyacente. Estas variables tienen un costo asociado representado también por la unión existente entre estos componentes. Ellos utilizan estos precios para optimizar sus variables locales, y por otro lado las variables públicas en cada red se comparan. Cuando la diferencia en las variables públicas sea menor a la tolerancia seleccionada se considera resuelto el problema. Finalmente, cuando no se logre la diferencia deseada se recalculan los costos asociados (BOYD, 2008).

Se implementó esta filosofía en la resolución de problemas descentralizados de circuitos eléctricos y sistemas de potencia.

1.2 CIRCUITOS ELÉCTRICOS

Un circuito es una red eléctrica de energía formada por la interconexión de elementos tales como resistencias, inductores, fuentes, interruptores y semiconductores. El modelamiento de los sistemas de distribución se puede asimilar a los circuitos eléctricos. A continuación se mostrará cómo se puede replantear el problema de hallar las tensiones y corrientes de un circuito eléctrico para solucionarlo de manera descentralizada.

1.2.1 Descripción del problema Los circuitos analizados en esta sección son de tipo eléctrico y no electrónico, están conformados solo por componentes lineales (resistores, inductores,

capacitores, fuentes AC, fuentes DC), y se clasifican en elementos que suministran o consumen energía. Cuando entregan energía son llamados elementos activos y si consumen son elementos pasivos.

Los activos como las fuentes AC o DC, suministran en teoría una tensión constante en un circuito, asumiendo que es una fuente ideal de tensión, y a ésta fuente se encuentran conectados elementos pasivos o activos. La tensión, la corriente, la potencia y energía son algunas de las constantes o variables que se tienen dentro de un circuito. Para la solución de problemas de circuitos interconectados, se encuentran muchas leyes (tales como ley de ohm, ley de *Kirchhoff*, ley de coulomb, entre otras) que nos ayudan a comprender física y matemáticamente la relación de cada uno de los parámetros o variables mencionadas anteriormente. Todas estas leyes permiten la formulación de ecuaciones que determinan el comportamiento de las variables en el sistema

Haciendo hincapié en la ley de *Kirchhoff* (ver ecuación 1.3) para corrientes y la ley de ohm (ver ecuación 1.4), la primera, establece que la sumatoria de las corrientes que entran y salen de un nodo es igual a cero, dónde un nodo se define como un punto eléctrico donde dos o más elementos tienen una conexión común; por otro lado, la ley de Ohm establece que la corriente es directamente proporcional a la tensión y esta proporcionalidad está definida como la resistencia. Con estas dos leyes se puede resolver cualquier variedad de problemas asociados a circuitos eléctricos.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (1.3)$$

$$R = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (1.4)$$

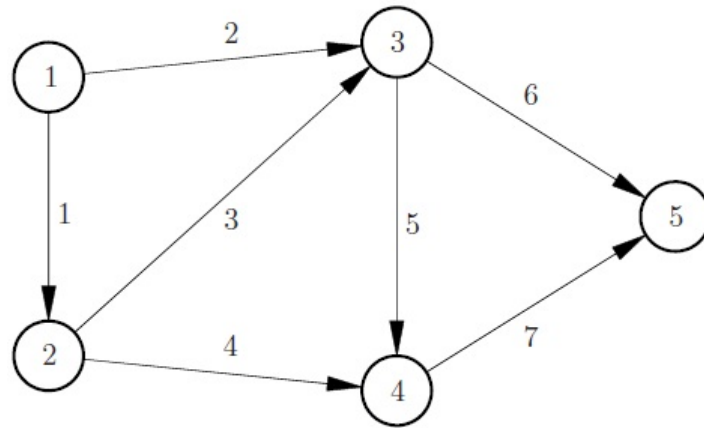
En las siguientes subsecciones se verá la importancia de solucionar por medio de corrientes un circuito eléctrico, teniendo como referencia el problema de flujo mínimo.

1.2.2 El problema del flujo mínimo en circuitos eléctricos Si se considera un sistema o una red, que está definida por su número de nodos y líneas que están interconectados entre estos, como se observa en la Figura 1.3. El flujo se define como una cantidad escalar transportada por las líneas x_j . El paso por estas conexiones de un nodo a otro representan unos costos, que están asociados ya sea a la cantidad de información que transporte, a la cantidad de energía que circula, o la relación corriente-tensión para un circuito eléctrico. De igual manera, siendo una cosa o la otra tenemos las características topológicas del sistema que están dadas por la

matriz A , donde se puede divisar los nodos conectados entre ellos y la dirección del flujo para un nodo en especial. Adicionalmente se tiene un flujo externos s_j (Si s_j es diferente de cero siempre habrá una inyección de flujo externo), que puede estar entrando o saliendo del nodo. El balance del flujo para un nodo dado está dado por la siguiente expresión (BOYD, 2008).

$$Ax + s = 0 \tag{1.5}$$

Figura 1.3.: Sistema conformado por 5 nodos y 7 líneas BOYD (2008)



Dónde A también es llamada la matriz de incidencia del sistema.

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si el flujo entra al nodo } i \\ -1 & \text{Si el flujo sale del nodo } i \\ 0 & \text{Si no hay flujo desde el nodo } i \text{ a } j \end{cases} \tag{1.6}$$

Ahora bien, se puede considerar una función objetivo que consiste en los costos del flujo por cada una de las ramas como:

$$\phi(x) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x_j) \tag{1.7}$$

Para la red o el sistema contemplado pueden existir otras restricciones, empero, ahora solo se considera el balance de flujo dado en la ecuación 1.5. Por consiguiente, el problema, es un problema de optimización condicionado por $Ax + s = 0$ buscando minimizar la función objetivo $\sum_{j=1}^n \phi_j \times (x_j)$.

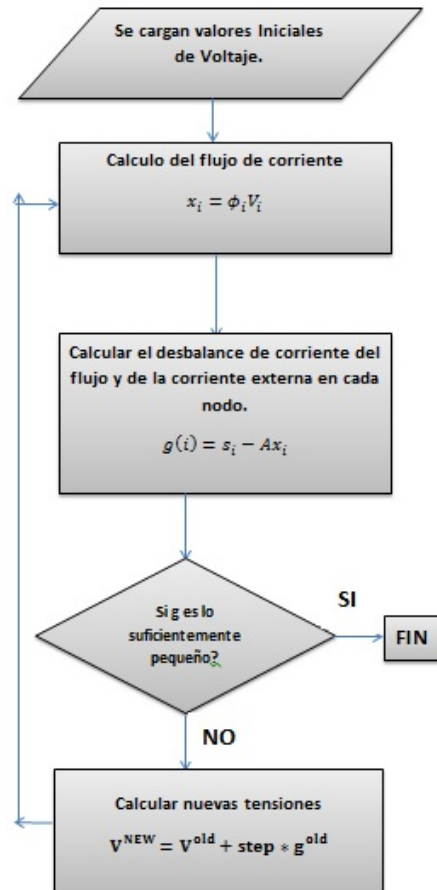
Este problema es llamado el “*single commodity network flow*”, y se utiliza el método dual para resolverlo; éste método ofrece una alternativa descentralizada para desarrollar el proble-

ma. La descripción y el procedimiento matemático se pueden consultar en el artículo (BOYD, 2008).

Asimilando la metodología de resolución del flujo mínimo hacia los circuitos eléctricos, se establecen muchas analogías con las que se traslada el problema a un circuito eléctrico. La variable x_j representa ahora el flujo de corriente por la línea j , es decir todas las corrientes de línea que llegan al nodo j y salen del nodo i . La fuente s_i es una corriente externa inyectada al nodo i . La variable S_i consiste en la diferencia entre las corrientes que entran y salen del nodo i . Claramente el balance del flujo en este caso corresponde a la sumatoria de corrientes por el nodo, dada por $Ax + s = 0$, que corresponde a la ley de corrientes de *Kirchhoff* (KCL) en donde A determina la topología del sistema. El parametro ϕ_j es la relación tensión-corriente y determina la resistencia p

La variable de tensión en el nodo es V_i . El diferencial de potencia es la diferencia de tensiones escogiendo arbitrariamente cualquier nodo como referencia. El algoritmo para resolver el problema en un circuito se representa en el diagrama de flujo de la Figura 1.4. Inicialmente se cargan los valores de tensión en cada uno de los nodos. Seguidamente, se calculan los flujos de corriente con el diferencial de tensión entre los nodos que interconectan la línea. Y finalmente, se verifica que el balance de corrientes en todos los nodos sea menor a la tolerancia especificada. Cuando es menor a la tolerancia, se considera el problema resuelto, por el contrario, cuando resulta mayor se realiza el cálculo de las nuevas tensiones para repetir el procedimiento desde el paso dos.

Figura 1.4.: Diagrama de flujo para el procedimiento de solución de flujos mínimos en un circuito eléctrico



Seguidamente, se tratará en la próxima sección la utilización de este tipo de metodología para resolver problemas a temas relacionados con sistemas de potencia. Estos problemas no son lineales e involucran un análisis numérico.

1.3 SISTEMAS DE POTENCIA

El análisis de los sistemas de potencia se utiliza para la coordinación de operación de los sistemas existentes con el propósito de garantizar siempre la continuidad en el servicio. El estudio de los sistemas de potencia también ayuda a la planeación, operación y diseño en la expansión de estos. Los parámetros principales que se analizan son las tensiones en cada una de las barras, las potencias inyectadas al nodo y el flujo de energía por las líneas.

Las herramientas computacionales utilizadas hasta ahora permiten resolver la mayoría de problemas de flujo de potencia por medio de diferentes métodos, sin embargo, contemplando la

complejidad de los sistemas de potencia actuales, como los de generación distribuida (y su afinidad con los sistemas multiagente y este con los problemas descentralizados) se investigó y desarrolló otra metodología más acorde con la naturaleza distribuida de los problemas. A continuación se describirá brevemente como se caracteriza un sistema de potencia, tomando esencialmente los parámetros anteriormente mencionados y examinando algunos de los métodos numéricos que se utilizan para su solución, seguidamente, se implementará una metodología para resolver de manera descentralizada un flujo de cargas. Por último se realizará la implementación de éste método en los sistemas de potencia de referencia que contienen 5 y 26 barras.

1.3.1 Descripción del problema Para la resolución de flujos de carga se utiliza la matriz Y_{Barra} , que representa la caracterización del sistema o la topología de la misma. Inicialmente, se contempla que el sistema de potencia puede estar conformado por tres tipos de barra. La barra PV, barra PQ y la barra de compensación, las cuales están clasificadas de acuerdo a las cantidades especificadas de tensión (en magnitud y ángulo) y potencia (activa y reactiva).

La barra de compensación es la encargada de suministrar las potencias activas y reactivas faltantes para alimentar la demanda. Está conectado siempre a un generador y puede tener carga asociada, su tensión tanto en magnitud y ángulo están definidas.

La barra PV es una barra que tiene asignada inicialmente una potencia de generación, y una magnitud de tensión constante. El ángulo de la tensión y la potencia reactiva inyectada son sus incógnitas. Sin embargo, cuando la potencia reactiva no sea lo suficientemente baja o alta para mantener la magnitud de la tensión en la barra, esta barra se convertirá en una barra PQ.

La barra PQ se diferencia de las anteriores barras porque no tiene una tensión definida, ni en magnitud y ángulo, pero son conocidas sus cantidades de potencia activa y reactiva inyectadas, A continuación, se presenta en la Tabla 1.1 un diagrama de las variables de estado en cada una de las barras y el número de ecuaciones que éstas proporcionan.

El método de Gauss Seidel resuelve las ecuaciones del flujo de potencia en coordenadas rectangulares, hasta que la diferencia de los voltajes de una iteración a otra sean menores al ajuste que se determine. Existe otro método que es el Newton Raphson que resuelve las ecuaciones en forma polar hasta que la diferencia de potencias activas y reactivas sean menores al criterio

Tabla 1.1.: Resumen del problema de flujos de potencia

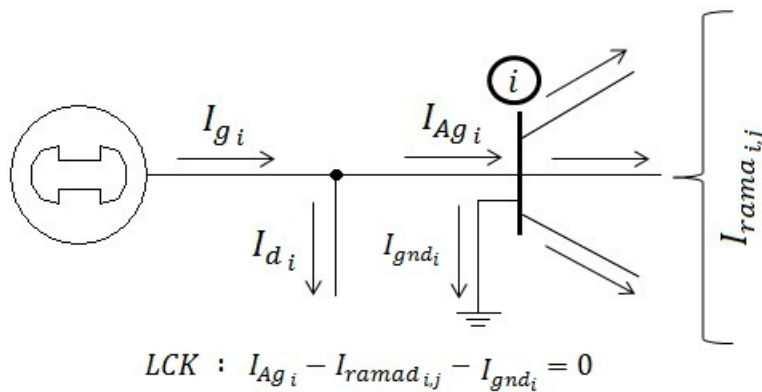
Tipo de barras	No de barras	Cantidades especificadas	No de ecuaciones disponible	No de variables de estado
Slack	1	$\delta_i, /V_i/$	0	0
PV	N_g	$P_i, /V_i/$	N_g	N_g
PQ	$N - N_g - 1$	P_i, Q_i	$2(N - N_g - 1)$	$2(N - N_g - 1)$
Totales	N	$2N$	$2N - N_g - 2$	$2N - N_g - 2$

que se establezca. A continuación, se describirá la implementación realizada para la solución de manera descentralizada del flujo de cargas en un sistema de potencia, que tiene una fuerte relación con el método numérico del Gauss Seidel.

1.3.2 Metodología del Gauss Seidel descentralizado En la Figura 1.5 se tiene una barra típica i . Para la implementación del flujo de potencia de manera descentralizada inicialmente es necesario establecer un conjunto de corrientes que se describe de la siguiente manera (ver Figura 1.5) :

- I_{rama} : Sumatoria de corrientes de rama que salen del nodo i y terminan en un nodo adyacente.
- I_{gnd} : Corriente que sale desde la barra hacia tierra.
- I_{ag} : Corriente inyectada por la generación y carga de la barra.
- I_d : Corriente inyectada por parte de la carga.
- I_g : Corriente inyectada por parte de la generación.

Figura 1.5.: LCK en una barra PV



El desarrollo del algoritmo para resolver un flujo de potencia de manera descentralizado esta basado en la filosofía de la descomposición. Para tal caso, cada una de las barras que compone el sistema soluciona un balance parcial de corriente, contemplando valores propios y valores de barras adyacentes. Para el flujo de potencia descentralizado, las barras adyacentes son aquellas que se encuentran conectadas eléctricamente. Existe un agente por cada barra y cada agente comparte información local con aquellos agentes ubicados en barras adyacentes. Con la información compartida (tensión en barras adyacentes) en conjunto con la información local disponible (la potencia aparente S_i , la tensión en la barra V_i y las admitancias de las ramas conectadas a la barra) el agente calcula las corrientes I_{rama} , I_{gnd} y I_{ag} . El algoritmo lo que busca es disminuir la diferencia de la I_{gnd} calculada con la tensión en la barra y la I'_{gnd} calculada como $I_{ag} - I_{rama}$. A continuación se explica detalladamente la metodología empleada.

Metodología de desarrollo En primer lugar se calcula la corriente de rama, la cual es la sumatoria de corrientes por cada una de las líneas conectadas al nodo. Esta corriente depende directamente de la admitancia equivalente entre la barra del agente y las barras adyacentes, y de la tensión en las barras adyacentes. Se determina con la siguiente expresión:

$$I_{rama} = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + Y_{i3}V_3 + \dots + Y_{in}V_n \quad (1.8)$$

Donde n representa el número total de barras en el sistema y el subíndice i la barra analizada. Con los subíndices de las admitancias se reconoce la línea por la cual esta circulando la corriente. El termino donde $i = n$ no se encuentra contemplado dentro de esta variable.

La corriente a tierra (I_{gnd}), es la corriente que sale desde la barra hacia tierra y es originada generalmente por la capacitancia equivalente de las líneas de transmisión conectadas a esta barra. Para un barra i , el elemento que contempla la admitancia propia a tierra es Y_{ii} y la corriente es determinada como:

$$I_{gnd} = V_i * Y_{ii} \quad (1.9)$$

Notese que en este punto del algoritmo, la corriente I_{gnd} es calculada con el valor estimado de tensión.

Las variables I_{gi} y I_{di} son las corrientes suministradas a la barra. Se considera una inyección de corriente negativa la realizada por la corriente de carga, y una inyección positiva por parte de la corriente de generación. Se determinan como:

$$I_d = \frac{P_d - Q_d}{V_i^*}$$

$$I_g = \frac{P_g - Q_g}{V_i^*}$$

Por último, la corriente inyectada I_{ag} es la corriente entregada por el generador menos la corriente suministrada por la carga. Esta corriente se da en terminos de las potencias programadas y también de la tensión en su propia barra. Se calcula como:

$$I_{ag} = \frac{P_{i\text{prog}} - jQ_{i\text{prog}}}{V_i^*} \quad (1.10)$$

Para un barra PQ de paso (barra sin generación ni carga) la corriente inyectada I_{ag} es igual a cero. Para una barra PQ con carga, las potencias programadas se mantendrán constantes e iguales a la demanda en dicha barra; y para una barra PV esta corriente esta restringida por los límites de potencia del generador, generalmente por la potencia reactiva generada. Para revisar si se violan los límites de potencia, primero se debe realizar el cálculo de la potencia generada en una barra (ver Figuras 1.6 y 1.7).

Figura 1.6.: Flujo de potencia activa en el nodo i

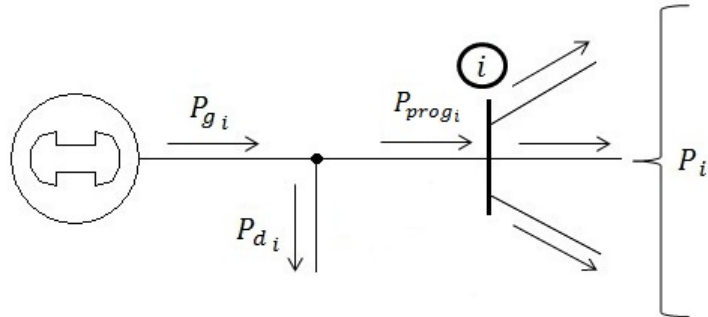
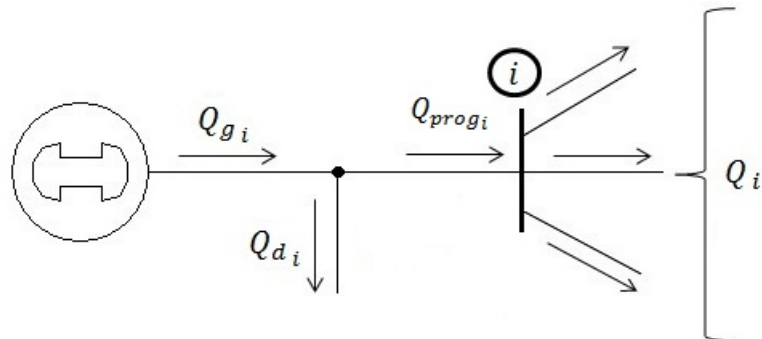


Figura 1.7.: Flujo de potencia reactiva en el nodo i



La expresión para las potencias programadas activas y reactivas son las siguientes:

$$P_{\text{prog}} = P_{gi} - P_d \quad (1.11)$$

$$Q_{\text{prog}} = Q_g - Q_d \quad (1.12)$$

Para calcular la potencia reactiva en función de las corrientes mencionadas se parte de la potencia inyectada en la barra i que es igual a:

$$S_{i\text{prog}} = V_i^* (Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + Y_{i3}V_3 + \dots + Y_{in}V_n)$$

$$P_{i\text{prog}} - jQ_{i\text{prog}} = V_i^* (Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + Y_{i3}V_3 + \dots + Y_{in}V_n)$$

$$P_{i\text{prog}} - jQ_{i\text{prog}} = V_i^* * (I_{rama} + I_{gnd})$$

Por lo tanto, la potencia programada queda al final en función de la corriente I_{rama} , la corriente I_{gnd} y la tensión de la barra propia, como se observa a continuación:

$$Q_{i\text{prog}} = -Im(V_i * (I_{rama} + I_{gnd})) \quad (1.13)$$

Finalmente, se determina la potencia generada reactiva despejando de la expresión 1.12:

$$Q_g = Q_{\text{prog}} - Q_d$$

Si $Q_{\min} \leq Q_g < Q_{\max}$ se toma la potencia Q_g para calcular la corriente inyectada I_{ag} , por el contrario cuando está potencia esté por fuera de los límites se asigna el valor mínimo o el valor máximo para el cálculo de dicha corriente. Es decir que si $Q_g < Q_{\min}$ o $Q_g > Q_{\max}$, se establece $Q_g = Q_{\min}$ o $Q_g = Q_{\max}$ respectivamente, para el calculo de la corriente inyectada (I_{ag}). Además, esta barra se convertiría en una barra con características PQ.

El cálculo de las corrientes I_{rama} , I_{gnd} y I_{ag} por parte de los agentes es el primer paso en el desarrollo del flujo descentralizado (como se podrá observar solo se utilizaron valores locales y adyacentes de tensión, en conjunto con las admitancias de rama conectadas a la barra, para hallar estos parametros).

El segundo paso consiste en contrastar las corrientes I_{gnd} y I'_{gnd} , donde I'_{gnd} consiste en la diferencias de las corrientes planteadas en el LCK de la Figura 1.5:

$$I'_{\text{gnd}} = I_{\text{ag}} - I_{\text{rama}} \quad (1.14)$$

Si observamos, la corriente I'_{gnd} depende tanto de valores locales y adyacentes; por el contrario, I_{gnd} sólo de los valores propios. La diferencia entre estas dos corrientes señaladas establece una nueva corriente expresada como:

$$I_{\text{dif}} = I'_{\text{gnd}} - I_{\text{gnd}} = 0 \quad (1.15)$$

Si la corriente I_{dif} es lo suficientemente pequeña, de acuerdo a un criterio asignado, se considera resuelto el problema; de lo contrario, se tienen que actualizar el valor propio de tensión en cada agente. La actualización de este valor está definida en función de las corrientes planteadas de la siguiente manera:

$$V_i^k = V_i^{k-1} + \left(\frac{I_{\text{dif}}}{Y_{ii}} \right) \quad (1.16)$$

Si se desglosa la expresión se tiene:

$$V_i^k = V_i^{k-1} + \left(\frac{I'_{\text{gnd}} - I_{\text{gnd}}}{Y_{ii}} \right)$$

$$V_i^k = V_i^{k-1} + \left(\frac{I'_{\text{gnd}} - V_i^{k-1} \times Y_{ii}}{Y_{ii}} \right)$$

$$V_i^k = V_i^{k-1} + \frac{I'_{\text{gnd}}}{Y_{ii}} - V_i^{k-1} = \frac{I'_{\text{gnd}}}{Y_{ii}} = V_{\text{corr}}$$

Para una barra PV, se actualiza solamente el valor del ángulo de la tensión. Por otro lado, para barras PQ se cambia tanto el ángulo como la magnitud de la tensión. La función del agente de la barra Slack consiste sólo en compartir información local, este no desarrollará el proceso descrito anteriormente, sólo espera a que sea resuelto problema para que se le asignen sus potencias generadas.

Finalmente, el proceso iterativo continúa calculando una nueva tensión hasta que la corriente I_{dif} sea menor a la tolerancia asignada. En la tabla 1.2, se describe paso a paso las acciones que ejecutan los agentes para la desarrollo del flujo de cargas de manera descentralizada.

Tabla 1.2.: Algoritmo de flujos de potencia implementado en el proyecto

```

Cargar valores iniciales ( $S_i, V_i$  y  $Y_{barra}$ ).
Se inicializa  $I_{dif} = 0.5$ 
While  $I_{dif} > Error$ 

    Calcula las corrientes  $I_{rama}$  y  $I_{gnd}$ .
    Se halla la potencia  $Q_g$ .
    if
         $Q_{min} \leq Q_g < Q_{max}$     $Q_g = Q_g$ 
         $Q_g < Q_{min}$             $Q_g = Q_{min}$ 
         $Q_g \geq Q_{max}$           $Q_g = Q_{max}$ 
    Se calcula la corriente  $I_{ag}$ 
    Se halla la corriente  $I'_{gnd}$  como  $I'_{gnd} = I_{ag} - I_{rama}$ .
    Se calcula  $I_{dif}$  como  $I_{dif} = I'_{gnd} - I_{gnd}$ 
    Actualización valores de tensión ( $V_i$ ).

Finaliza el algoritmo

```

A continuación, se presenta la implementación de este algoritmo en una plataforma multi-agente para resolver un flujo de potencia descentralizado.

1.3.3 Implementación Gauss-Seidel descentralizado en una plataforma multiagente Se cuenta con 2 sistemas de potencia del libro (SAADAT, 1999) como sistemas de prueba, uno de 5 barras y otro de 26 barras los cuales fueron implementados en un sistema multiagente con JASON.

El primer paso en el sistema de la solución del flujo de potencia descentralizado, consiste en identificar por parte de cada uno de los agentes quienes son sus vecinos (entendiéndose como agentes cada una de las barras del sistema de potencia, y como vecinos todas barras adyacentes con las que tenga una conexión eléctrica). La comunicación de un agente y otro sólo se podrá realizar si son vecinos; de manera que todas las posibles interacciones entre los agentes dependerán del número de barras y de las conexiones eléctricas que existan entre ellos. Agente *nodo* fue la asignación que se le dio a los agentes de flujo. A continuación se muestran unas líneas del código de JASON, en donde el plan *"pregunta"* siempre es ejecutado al inicio del código. Con este plan los agentes preguntan por sus vecinos y a su vez por medio de este se lanza un nuevo plan, en este caso *"ansV"*, la cual busca conocer la tensión de sus vecinos.

Capítulo 1. SOLUCIÓN AL FLUJO DE POTENCIA DESCENTRALIZADO

```
+!pregunta
:true
<- ?vecinos(X);
    .send(X,achieve,ansV);
```

La topología general del sistema se encuentra cargada en el *environment*, éste tiene la información de todo; como son las potencias activas y reactivas programadas (P_{prog} , Q_{prog}), las tensiones iniciales V_i , los límites de potencia activa y reactiva (P_{min} , $P_{máx}$, Q_{min} , $Q_{máx}$), y la matriz de admitancias del sistema Y_{barra} .

Cuando cada agente tenga la información de tensión, se ejecutará el plan "*corriente*" en el agente *nodo*, que tiene como función resolver el flujo de cargas por medio de la metodología abordada anteriormente. En las siguientes líneas del código se puede observar cuando se lanza la función "*gaussseidel*" (Si la función tiene un punto al inicio de la línea del código es porque consiste en una función interna del programa, de lo contrario es una llave que ejecuta un código en el *environment*).

```
+!corriente
:true
<- .findall([X,Y],tension(X,Y),T);
    ?vmagnitud(Mag);
    ?vangle(Ang);
    gaussseidel(Mag,Ang,T);
    .abolish(tension(_,_));
    !!actualiza.
```

Las líneas del código anterior que comienzan con un signo de interrogación como "*?vmagnitud(Mag)*" es una creencia en forma de precepto, porque es percibida del *environment*. Para este ejemplo los dos interrogantes que se encuentran en las líneas 4 y 5 del código anterior, se adquieren los preceptos de magnitud y ángulo de la tensión, respectivamente. Al finalizar, el flujo parcial que resuelve cada agente adquiere el valor de su propia I_{dif} . Este precepto lo adquiere del *environment* con las siguientes líneas del código.

```
addPercept(agName,Literal.parseLiteral("surplusmag("+Idif)"))
```

En la última línea del código del plan "*corriente*" se encuentra el lanzador "*!!actualiza*". Apenas termine este plan empezará el plan "*actualiza*", que se describe con las siguientes líneas de código en JASON.

```
+!actualiza
```

```

: true
<- ?surplusmag(DImag);
    ?surplusang(DIang);
    ?vmagnitude(Mag);
    ?vangle(Ang);
    .my_name(Me);
    next(Mag, Ang, DImag, DIang);
    .abolish(surplusmag(_));
    .abolish(surplusang(_));
    .send(g, tell, verificadimag(Me, DImag)).

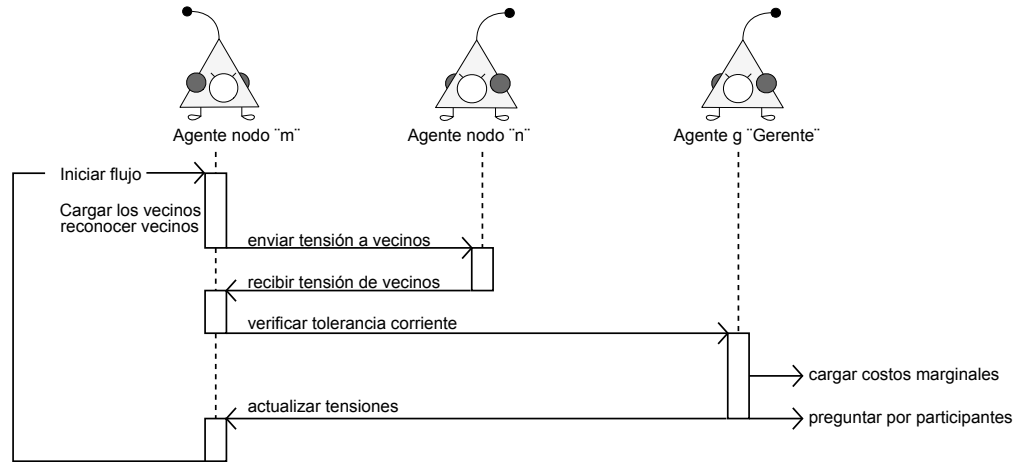
```

Este plan *"actualiza"* ejecutará la función *"next"*, que consiste en la actualización de las tensiones de acuerdo al tipo de barra. La función interna *"abolish"* remueve los preceptos que contenga el agente. En este caso después de ser actualizadas las tensiones, por medio de la llave *"next"* ejecutada en el *environment*, se eliminan los preceptos antiguos de tensión. Y finalmente, los agentes *nodo* les comunicarán sus datos al agente *g*. En la última línea del código se puede apreciar la función interna *"send"* que es una comunicación que adquiere el agente *g* como creencia con el nombre de *"verificadimag"*. Con esta creencia el agente *g* ejecuta las acciones que decidirán detener el flujo o no de acuerdo a la tolerancia sobre la corriente I_{dif} .

Para la actualización de las tensiones se conoce que en las barra PQ, la tensión cambia tanto en ángulo y en magnitud, y por otro lado, que la tensión en la slack es constante. Para las barras PV solo se actualiza el ángulo de la tensión. Los preceptos de los agentes van a cambiar y van a recibir por parte de los vecinos un valor diferente de tensión. Cuando se cargan los nuevos preceptos de tensión, se repite el proceso y se resuelve el flujo en cada barra, calculando estos mismos sus valores de I_{dif} . Este procedimiento es iterativo hasta que el agente *g* decida detener el flujo.

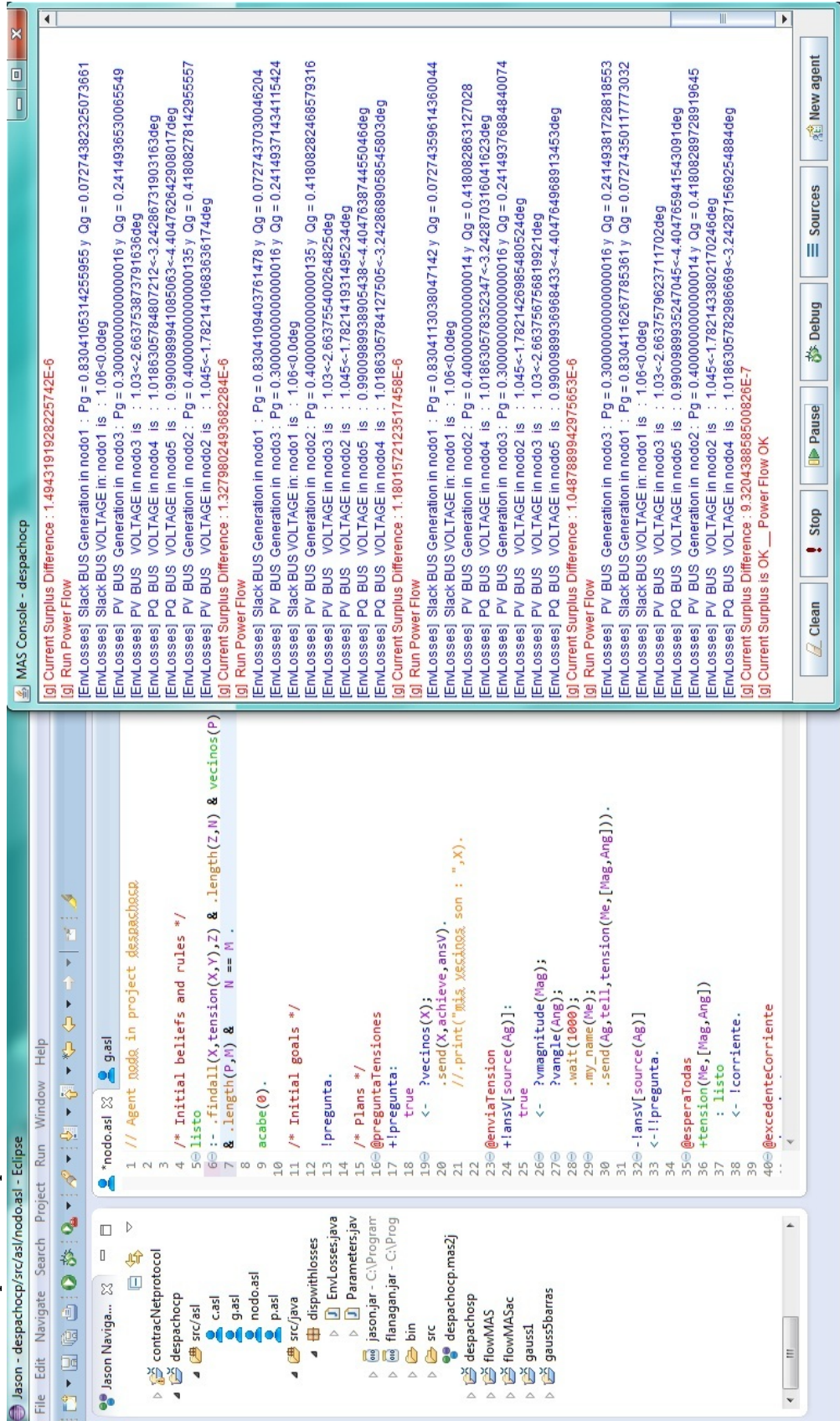
La implementación de este método en la plataforma multiagente se realizó con los sistemas de 5 y 26 barras mencionadas al inicio de la subsección, y en los que se pueden observar sus esquemas y la solución al flujo de manera centralizada en el anexo A. Allí se encuentran los resultados finales para los sistemas de 5 y 26 barras. En el diagrama de la Figura 1.8 se resume el comportamiento del agente *nodo* correspondiente al flujo en la solución del problema. Recordar que el agente *nodo* está compuesto por todos los agentes de flujo.

Figura 1.8: Interacción entre los agentes de nodo



En la Figura 1.9 se muestra el flujo de cargas resuelto en una plataforma multiagente para el sistema de 5 barras, no obstante, en el capítulo de resultados se encuentran los datos de interés para la solución del flujo de cargas en forma descentralizada en el MAS para los mismos sistemas.

Figura 1.9.: Sistema multiagente en JASON. A la izquierda se encuentra parte de la estructura del código en JASON del agente nodo. Y a la derecha de la consola se muestran los resultados del flujo de cargas implementado para el sistema de 5 barras.



CAPÍTULO 2

SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO SIN Y CON PÉRDIDAS

Los combustibles fósiles se convirtieron en productos esenciales para la sociedad moderna, debido al crecimiento constante de la demanda industrial y el aumento de la población. Las reservas fósiles se están agotando y se hace necesario recurrir a alternativas diferentes que hagan mejor uso racional de la energía, generando el menor impacto económico posible. Una solución a este problema son las fuentes no convencionales de energía, como la energía eólica, solar y la biomasa. En este capítulo se desarrollará un algoritmo descentralizado de un despacho económico, con el objetivo de programar las salidas de generación de las diferentes plantas de energía de la manera más eficiente. Este despacho está enfocado en sistemas de generación distribuida, hacia un posible crecimiento de estas fuentes de energía en el país, teniendo en cuenta que los sistemas deben estar acompañadas de buenas regulaciones que estimulen el uso de estas energías.

El capítulo está compuesto de la siguiente manera: En la primera sección, se muestran las curvas de costos de plantas energéticas que tienen influencia directa con la metodología del despacho. En la sección 1.3 se aplica esta filosofía para desarrollar el problema de despacho sin pérdidas, la implementación en una plataforma multiagente (MAS) que se adapta principalmente a problemas de una naturaleza descentralizada. Y finalmente, en la sección 1.4 se resolverá un problema de despacho económico con pérdidas de manera descentralizada en el MAS.

2.1 COSTOS DE LA ENERGÍA

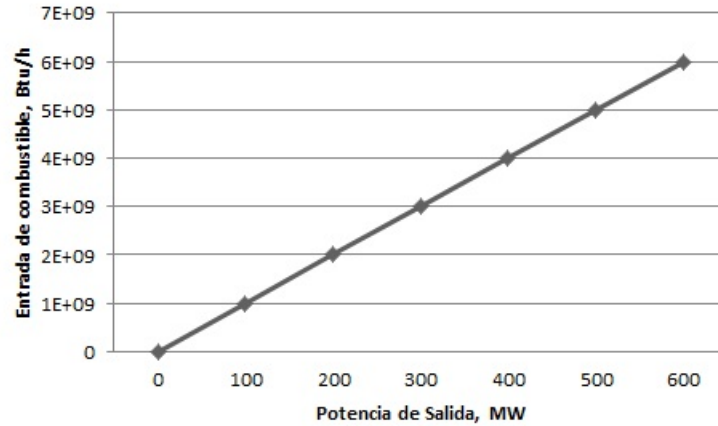
La finalidad de programar diariamente los recursos de generación consiste principalmente en atender la demanda con criterios de economía, calidad y confiabilidad, con base en la disponibilidad de los generadores y de sus precios. Un programa del despacho final de generación se puede realizar de diferentes formas de acuerdo a los tipos de mercados, en donde la curva de costos de cada planta influye de manera directa en la distribución económica de las potencias activas en las plantas de energía.

2.1.1 Descripción del problema Los costos asociados a la producción de energía en Colombia para las plantas térmicas dependen principalmente del uso de combustibles fósiles (XM, 2014). Los crecimientos constantes en el precio de éste producto hace volátil el costo en un despacho de energía; por el contrario, los costos asociados a las fuentes renovables se dan principalmente por la alta inversión inicial, resaltando que éstas tecnologías aún siguen siendo muy costosas para competir en las canastas de energía. Sin embargo, el precio de las tecnologías renovables a pesar que aún es muy alto va en decrecimiento y por otro lado, el de las fuentes convencionales en aumento según (XM, 2014). En un futuro se tendrá que estimular el uso de fuentes renovables de energía en el país para impulsar su desarrollo y reducir el impacto ambiental. A continuación, se describirá la función de costos y el costo incremental de una planta eléctrica.

Costos en las plantas eléctricas La idea de modelar la curva de costos de una planta eléctrica mediante una función, es para ser utilizada dentro de un algoritmo de despacho. Con la curva de costos se define la manera más viable de distribuir las potencias en las plantas conectadas a un sistema, ya que esta curva depende directamente de la potencia entregada por cada unidad o planta de generación. Dicha función para las plantas termoeléctricas están muy asociadas a los costos del combustible, que es el principal parámetro de referencia para modelar la curva de costos en dichas plantas. La tasa interna de retorno, la mano de obra y el mantenimiento son otros parámetros a tener en cuenta dentro de la función de costos.

En la Figura 2.1, se expresa la potencia de salida en $[MW]$ en función de la entrada de combustible en un planta de combustible fósil, dada en unidades térmicas británicas Btu/h. Las ordenadas de la gráfica se convierten a dólares por hora al multiplicar la entrada de combustible por el costo de combustible dado en dólares por millón de Btu.

Figura 2.1.: Curva entrada-salida por una unidad generada de combustible fósil. Adaptada de GRAINGER (1996)



El costo incremental del combustible, se determina por las pendientes de las curvas de entrada-salida de las dos unidades. Si se expresan las ordenadas de las curvas entrada-salida en dólares por hora :

$$f_i = \text{entrada a la unidad } i \text{ dólares por hora } (\$/h)$$

$$P_{gi} = \text{salida de la unidad } i \text{ MegaWatts (MW)}$$

El costo incremental de combustible de la unidad en dólares por MegaWatt-hora es $(\partial f_i / \partial P_i)$, mientras que el costo promedio del combustible en las mismas unidades es (f_i / P_i) . Por lo tanto, si la curva entrada-salida de la unidad i es cuadrática se denota :

$$f_i = \frac{a_i}{2} P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + C_i \quad (2.1)$$

Y el costo incremental del combustible denotado por λ_i es :

$$\lambda_i = \frac{\partial f}{\partial P_{gi}} = a_i P_{gi} + b_i \quad (2.2)$$

Donde a , b y c son constantes. El costo incremental del combustible representa el costo adicional en dólares por hora para incrementar la salida en potencia en 1[MW]. La ecuación 2.2 es bastante utilizada para resolver los problemas de optimización que se describen en la sección de despacho con pérdidas y sin pérdidas.

2.2

 OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA SIN PÉRDIDAS

En esta sección se desarrolla un algoritmo computacional que permite el análisis de la operación de mercados eléctricos sin considerar las pérdidas (despacho ideal), en otras palabras, considerando el sistema de potencia un sistema uninodal. El algoritmo tiene una naturaleza descentralizada y el mercado implementado tiene algunas características de un mercado bilateral. Los agentes del mercado realizan negociaciones entre ellos para tasar un precio óptimo para el sistema. Para un despacho de energía sin pérdidas o con pérdidas dicha optimización se obtiene al igualar los costos marginales de los agentes del mercado. A continuación, se expone esta idea, abordando un problema con dos agentes del mercado.

2.2.1 Descripción del problema Si se cuenta con un sistema uninodal al que están conectadas varias fuentes de generación, es posible asociarles a cada una de estas plantas generadoras una curva de costos. Para atender una demanda en particular, lo ideal consistiría en redistribuir las potencias de los generadores de manera que minimice los costos globales del sistema. La curva de costos puede verse representada por una curva cuadrática o cubica. En todo caso al final se debe optimizar el problema generando las mejores alternativas de distribución de las cargas en las plantas. Derivando la función de costos con respecto a la potencia inyectada $\partial C_i / \partial P_i$ se obtienen los costos marginales de la planta i , como se mostró en la sección anterior. Los costos marginales representan el costo de aumentar en $1 MW$ la potencia de una planta. Si los costos marginales en todas las plantas tienden a ser el mismo, la solución es óptima. Supóngase que se tiene un sistema con las siguientes características en la función de costos, estas funciones de costos son tomadas de (GRAINGER, 1996).

$$C_1 = 200 + 8,0P_{g1} + 0,004P_{g1}^2$$

$$C_2 = 220 + 6,4P_{g2} + 0,0048P_{g2}^2$$

Y unos costos incrementales dados por :

$$\lambda_1 = 8,0 + 0,008P_{g1}$$

$$\lambda_2 = 6,4 + 0,0096P_{g2}$$

Si se desea la distribución de potencia más económica se debe plantear lo siguiente:

$$\text{Minimizar : } C_1 + C_2$$

Ahora, para éste ejemplo supóngase que la repartición de carga entre estas unidades es tal que el costo incremental de una de las plantas es mayor a la otra. Supóngase, que parte de la carga se transfiere desde una planta con el costo incremental mayor a la que tiene el costo incremental menor. Reducir la carga en la unidad que tiene el costo incremental más alto y aumentar a la del costo incremental más bajo, dará como resultado una reducción del costo total, si se hiciera de manera contraria. Se puede continuar la transferencia de carga, de una planta a otra con una reducción en el costo total, hasta que los costos incrementales de las dos plantas sean iguales. Por consiguiente, el problema de optimización en los costos operacionales de un sistema se reduce en igualar los costos incrementales de las plantas. Para este caso:

$$\lambda_1 = \lambda_2$$

En la Tabla 2.1 se muestran diferentes valores del costo incremental para suministrar una demanda de 900 [MW]. Cuando se tienen los mismos costos marginales se obtiene los costos más económicos. Empero, se tienen que tener en cuenta la carta de potencia de los generadores, para que en el momento de realizar esta operación no se violen los límites de generación.

Tabla 2.1.: Distribución de potencias activas en un sistema con dos plantas de energía

λ_1 [\$/MWh]	λ_2 [\$/MWh]	P_{g1} [MW]	P_{g2} [MW]	$C_1 + C_2$ [\$/h]
12.8	9.28	600	300	9012
12	10.24	500	400	8748
11.6	10.72	450	450	8682
11.2	11.2	400	500	8660

2.2.2 Metodología para la solución del despacho sin pérdidas Actualmente el precio de bolsa de la energía eléctrica en Colombia se resuelve asumiendo un sistema uninodal. Posteriormente, se realiza una reconciliación en las que son consideradas las pérdidas y se cubre la energía faltante o se reduce la energía excedente por medio de una nueva distribución de energía en las plantas eléctricas. El objetivo del desarrollo del algoritmo sin pérdidas es igualar los costos marginales de cada uno de los agentes de despacho, distribuyendo de manera económica las potencias generadas por las plantas. El resultado de la solución del despacho sin pérdidas como se verá más adelante, pueden ser utilizados como valores iniciales para el estudio de un despacho con pérdidas.

2.2. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA SIN PÉRDIDAS

Las negociaciones entre los agentes resume el desarrollo del algoritmo implementado en el despacho sin pérdidas. Dichas negociaciones se realizan sólo entre dos agentes, donde no es necesario que exista una conexión eléctrica (como si ocurría en los agentes nodo al implementar el flujo de potencia descentralizado). Para la optimización del problema, los agentes tienen que igualar sus costos marginales (CM) sujeto a un balance de potencia entre los agentes. A saber, siguen el siguiente comportamiento:

$$\lambda_m = \lambda_n \quad (2.3)$$

$$P_m^{(k)} + P_n^{(k)} = P_m^{(k-1)} + P_n^{(k-1)} \quad (2.4)$$

Donde :

λ_n : Costo marginal del agente n

λ_m : Costo marginal del agente m

$P_m^{(k)}$: Potencia del agente m en la iteración k

$P_n^{(k)}$: Potencia del agente n en la iteración k

$P_m^{(k-1)}$: Potencia del agente m en la iteración $(k - 1)$

$P_n^{(k-1)}$: Potencia del agente n en la iteración $(k - 1)$

Modo de negociación Para igualar los costos incrementales se adaptó la metodología tratada en (CAI, 2012). Básicamente, las dos plantas que vayan a realizar la negociación establecen los mismos costos marginales. Supóngase que se tienen dos plantas con la siguiente función de costos incrementales:

$$\lambda_n = \frac{\partial f_n}{\partial P_{gn}} = a_n P_{gn} + b_n$$

$$\lambda_m = \frac{\partial f_m}{\partial P_{gm}} = a_m P_{gm} + b_m .$$

Los costos marginales de cada planta se establecen por medio de la siguiente ecuación:

$$\lambda = a_T P_{gT} + b_T \quad (2.5)$$

Donde:

$$a_T = (1/a_n + 1/a_m)^{-1}$$

$$b_T = a_T(a_n/b_n + a_m/b_m)$$

$$P_{gT} = P_{gn}^{(k)} + P_{gm}^{(k)}$$

En consecuencia, la nueva distribución de potencia eléctrica en cada planta es la siguiente:

$$P_{gn}^{(k+1)} = (\lambda - b_n) / a_n \quad (2.6)$$

$$P_{gm}^{(k+1)} = (\lambda - b_m) / a_m \quad (2.7)$$

Antes y después de la negociación la suma de potencia de las plantas generadoras deben ser las mismas, como se planteó en la ecuación 2.4.

$$P_{gn}^{(k)} + P_{gm}^{(k)} = P_{gn}^{(k+1)} + P_{gm}^{(k+1)}$$

Además se debe tener en cuenta los límites de generación en cada planta. Si se llegasen a violar estos límites de potencia, los agentes se reasigna una nueva potencia de generación. Suponiendo que el agente m viola alguno de los límites, se determinan las nuevas potencias de la siguiente manera:

$$P_m^{(k)} = P_{mLimit}^{(k)}$$

$$P_n^{(k)} = P_m^{(k-1)} + P_n^{(k-1)} - P_m^{(k)} \quad (2.8)$$

Por consiguiente, los costos marginales (CM) de dichas plantas ya no pueden ser lo mismos, y se establecen unos nuevos como:

$$\lambda_{mCORR} = a_m P_{mLimit}^{(k)} + b_m .$$

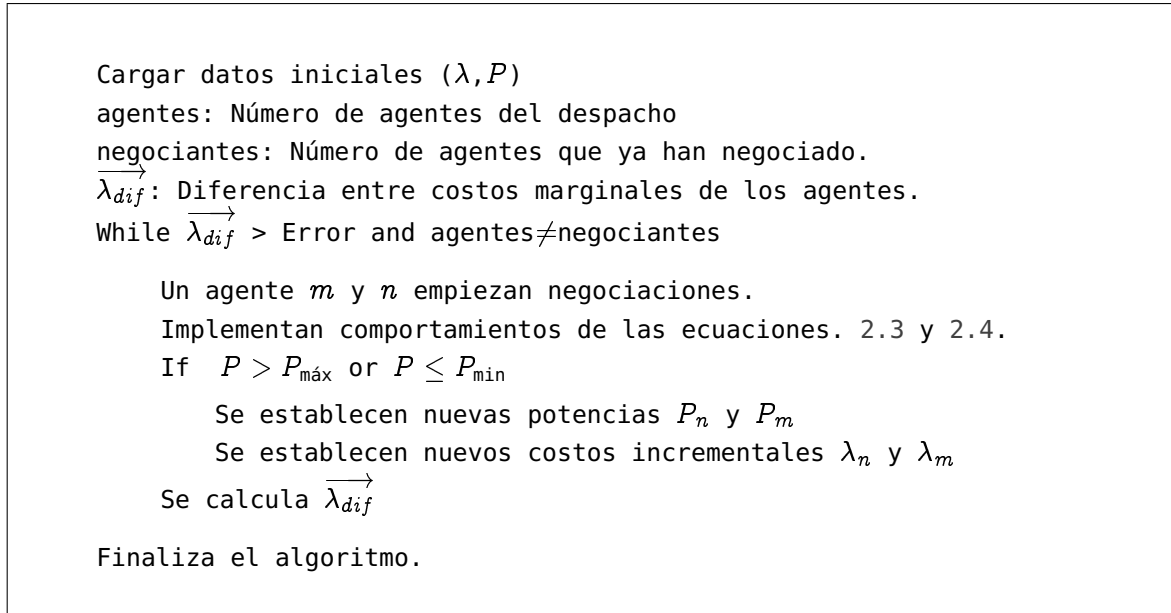
$$\lambda_{nCORR} = a_n P_n^{(k)} + b_n .$$

Este procedimiento es realizado hasta que todos los agentes del despacho hayan realizado por lo menos una negociación. Si la diferencia entre los costos marginales de los agentes se encuentran dentro de los niveles de tolerancia aceptados, se detiene el algoritmo, de lo contrario

2.2. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA SIN PÉRDIDAS

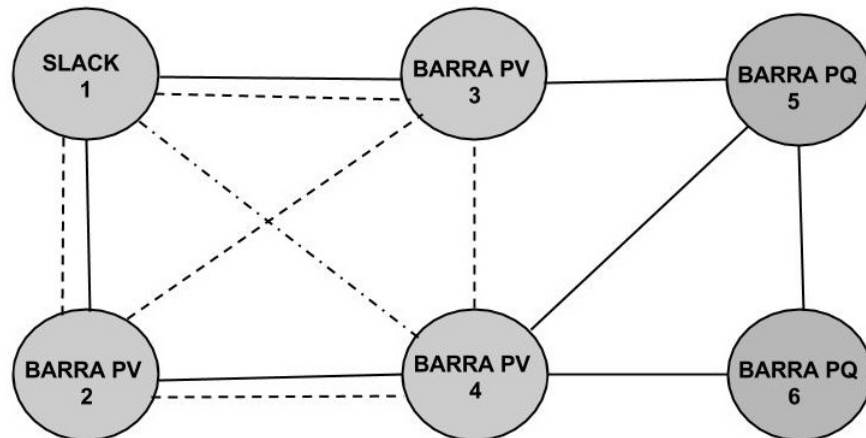
se continúa hasta cumplir dicha condición. Se resume el procedimiento de la metodología en la tabla 2.2.

Tabla 2.2.: Algoritmo para un despacho sin pérdidas



En la Figura 2.2, se muestra un esquema en el que las líneas punteadas muestran las posibles negociaciones entre los agentes del despacho y las oscuras las conexiones eléctricas del sistema.

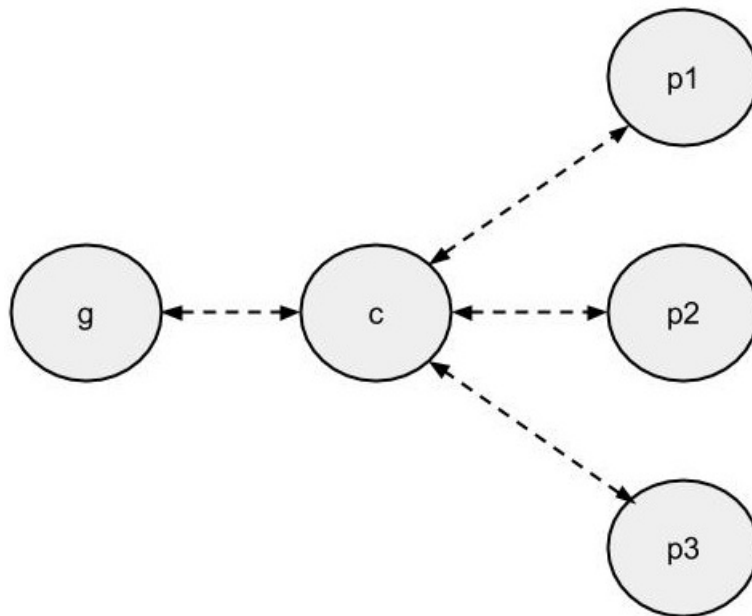
Figura 2.2.: Relación entre los agentes de despacho



A continuación, se presenta la implementación de este algoritmo en una plataforma multi-agente para resolver un despacho sin pérdidas.

2.2.3 Implementación del despacho sin pérdidas en el MAS En la plataforma MAS se construyeron tres agentes, el agente g , el agente c , y el agente p . En términos generales el agente g es quién comunica los resultados de la negociación hecha por los agentes del despacho cuando han acabado y han sido los óptimos, es también llamado el agente gerente. El agente c es quién recibe a los negociadores, revisa sus ofertas, elige los negociantes y confirma que todos ya hayan realizado por lo menos una negociación, también es llamado el agente controlador. Y finalmente el agente p , está compuesto por todos los participantes del despacho (en el caso del sistema de 5 barras, el agente slack, el agente PV_2 y el agente PV_3), que son los que implementan la metodología de negociación expuesta en la subsección anterior. Por otro lado, falta por mencionar el ambiente, que constituye el mundo "real" de los agentes, desde donde se ligan todas sus percepciones. El ambiente (*environment*) contiene información relevante que el agente utilizará para modelar sus comportamientos en base al modelo BDI (*Believe, desire and intentions*). Las interacciones en esta propuesta de implementación solo se dan entre agentes p , entre p y c , y entre c y g . La Figura 2.3 ilustra lo mencionado.

Figura 2.3.: Interacción entre los agentes del despacho para el sistema de 5 barras. Se muestra la comunicación entre los agentes.



Las posibles negociaciones entre un agente del despacho y otro, no implica que estén conectados eléctricamente, solo implica que la barra del sistema tenga una unidad generadora (por el contrario en el flujo de potencia si era necesario que entre los agentes existiera una conexión eléctrica). En las barras PV existen dos agentes, uno de flujo y otro de despacho, como se

2.2. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA SIN PÉRDIDAS

visualizaba en el esquema de la Figura 2.2, donde se había resaltado las posibles interacciones entre los agentes del despacho. En conclusión, los agentes p pueden negociar entre sí, sin importar si haya una línea de transmisión que interconecte sus barras.

El despacho comienza cuando el agente c pregunta por los participantes y sus ofertas. Los agentes p responderán dándose a conocer como participantes y después ofertan sus costos marginales. El código en JASON de esta parte es descrito de la siguiente manera. Al ejecutar el programa los agentes c y p adquieren unas creencias inmediatas. Las creencias de p son sus precios marginales, y del agente c en preguntar a p por los agentes que quieren ser partícipes del despacho. Las líneas del código de la parte inicial del agente c descritas en el programa JASON que se muestran a continuación. La línea que contiene `<- .broadcast(tell,introduccion)` es donde c les informa a todos los agentes p sus deseos.

```
!preguntaparticipantes.  
/* Plans  
@preguntaparticipantes  
+!preguntaparticipantes  
: true  
<- .broadcast(tell,introduccion).
```

Cuando los agentes p adquieren esta creencia, cada uno de ellos envía una respuesta afirmativa en la que se hacen conocer como participantes del despacho. En las líneas del código siguiente se puede apreciar esto.

```
+introduccion  
: .my_name(Me)  
<- .send(c,tell,introduction(participant,Me)); .  
send(c,tell,avance(Me)) .
```

Posteriormente, los agentes p ofertan sus costos marginales con la condición que ya sean participantes y se hayan adjuntado en p sus propios costos. En las siguientes líneas del código de JASON del agente p , se muestra el envío de la oferta. La línea del código que contiene dos puntos al inicio, es una condición para establecer esa creencia `+cfp` proveniente del agente c .

```
+cfp  
: introduccion  
<- ?marginalcost(Offer);  
.my_name(Me);  
.send(c,tell,propose(Offer,Me)).
```

Capítulo 2. SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO SIN Y CON PÉRDIDAS

Es decir que hasta el momento ya han sido recibidas todas las propuestas, y están dispuestos los agentes a negociar.

Ahora, el agente c se implementa el siguiente sistema de designación, para la negociación bilateral entre los agentes. Primero elige un agente al azar para que haga parte de la primera negociación (iniciador). Después, evalúa las diferencias en los costos marginales del agente escogido con los agentes restantes del despacho.

$$\lambda_{ini} - \lambda_n \text{ donde } n = 1, 2, 3, \dots, p$$

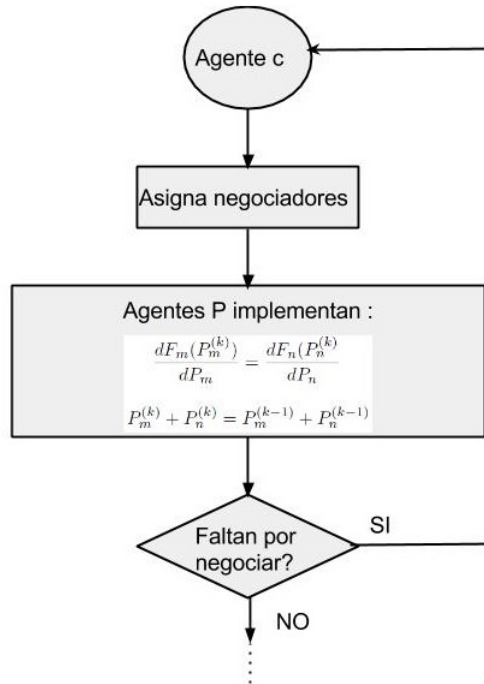
Donde p es el número total de agentes de despacho, exento el agente iniciador.

Y finalmente, con el agente que obtuvo la mayor diferencia es escogido por c para que realicen la negociación (agente ganador). Todo esto es realizado por el agente c , cuando termina, anuncia a los agentes que serán parte de la primera negociación. El método del “*Contract Net Protocol*” que adopta el libro (BORDINI, 2007) para la comunicación entre agentes, fue reestructurado para las conveniencias de esta parte del programa.

Cuando finaliza la negociación, el agente c vuelve y selecciona un iniciador, esta vez, alguien que aún no haya participado, y le asigna un negociante conforme a las máximas diferencias en sus costos marginales con los agentes restantes (ganador). Éste proceso se repite hasta que todos los agentes del despacho hayan negociado. En el diagrama de la Figura 2.4, se ilustra este proceso.

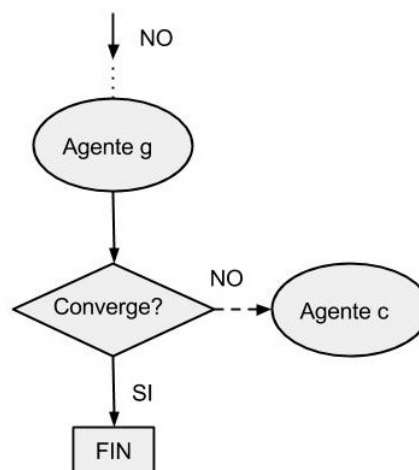
2.2. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA SIN PÉRDIDAS

Figura 2.4.: Diagrama de flujo agente C



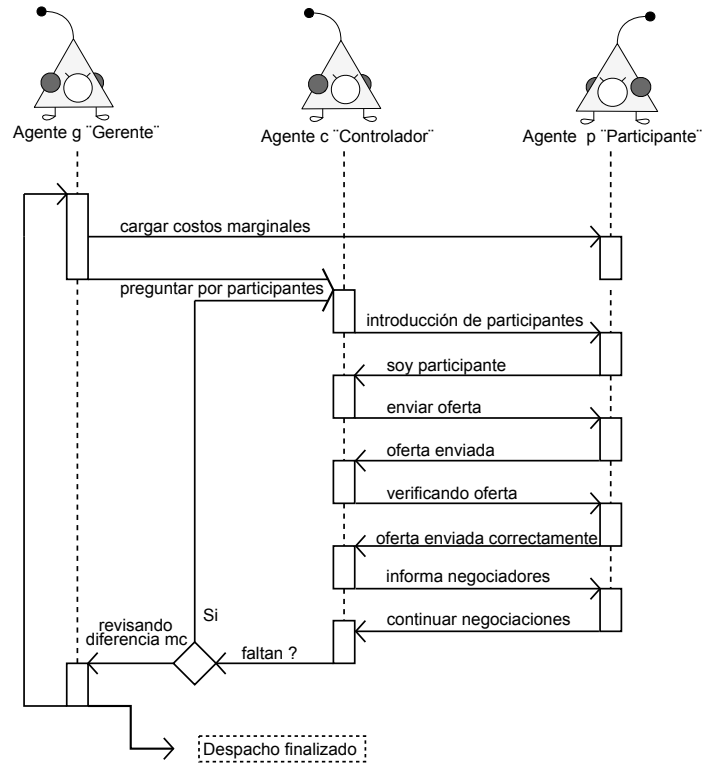
Las diferencias las registra el agente g , quien es el que evalúa las diferencias de los costos marginales entre todos los agentes. Si esta diferencia es menor a la tolerancia establecida finaliza el despacho. De lo contrario, le establece a c que vuelva recibir las ofertas y efectuar las negociaciones entre los agentes participantes, para iniciar una nueva etapa de negociación. Como se describe en la Figura 2.5, que es la continuación de la Figura 2.4.

Figura 2.5.: Diagrama de flujo del agente G



En la Figura 2.6 se resume el comportamiento entre los agentes c , p y g descritos anteriormente para un despacho sin pérdidas.

Figura 2.6.: Interacción entre los agentes p , g y c para un despacho sin pérdidas



En la siguiente sección se encuentra la temática para resolver un problema de despacho con pérdidas.

2.3 OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA CON PÉRDIDAS

La participación de los agentes del mercado en Colombia para la atención de una demanda de 62,196.6 GW en el año 2013 fue la siguiente: 67 % de energía hidráulica, 27 % de energía térmica y un 6 % de energía de plantas menores y cogeneradores (XM, 2014). Los sistemas que atienden alrededor del 94 % de la demanda del país están conformados por grandes centrales hidroeléctricas y termoeléctricas. Por el volumen de espacio que ocupan y los recursos que

2.3. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA CON PÉRDIDAS

utilizan estas plantas se encuentran alejadas significativamente de los centros de carga. Para una distribución económica de las potencias activas en las plantas de energía se tiene que tener en cuenta el factor distancia que hay entre estas centrales y puntos de carga. En esta sección se desarrolla un algoritmo para la distribución económica de energía en estas plantas de generación considerando las pérdidas en las líneas de transmisión, tal y como es presentado en (GRAINGER, 1996).

2.3.1 Descripción del problema En la sección del despacho sin pérdidas se obtenía una solución óptima al igualar los costos marginales de las diferentes plantas eléctricas como:

$$\frac{\partial f_1}{\partial P_{g1}} = \frac{\partial f_2}{\partial P_{g2}} = \frac{\partial f_i}{\partial P_{gi}}$$

teniendo en cuenta los límites de potencia en los generadores. Ahora, para un despacho con pérdidas, se debe considerar las pérdidas por las líneas de transmisión para realizar la distribución de potencia entre los agentes. Por ende, se considera el siguiente balance de potencias:

$$P_L + P_D - \sum_{i=1}^k P_{gi} = 0 \quad (2.9)$$

Donde:

P_D : Sumatoria de las demandas conectadas al sistema

P_L : Potencia de pérdidas por las líneas de transmisión

P_{gi} Potencia entregada por el generador i

k : Número de plantas o barras con generación.

El nuevo problema ahora consiste en minimizar la función de costos:

$$F = f_1 + f_2 + \dots + f_k \quad (2.10)$$

Sujeta al balance de potencia de la ecuación 2.9, donde f_k es la función de costos de la planta k .

Este tipo de problemas puede ser resuelto por el método de los multiplicadores de Lagrange:

$$F = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) + \lambda \left(P_L + P_D - \sum_{i=1}^k P_{gi} \right) \quad (2.11)$$

Capítulo 2. SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO SIN Y CON PÉRDIDAS

Donde λ es el multiplicador de lagrange. Para el problema de despacho, el parametro λ representa los costos incrementales del sistema. Para minizar la función de costos planteada en la ecuación 2.11, se deriva esta ecuación con respecto a la potencia generada en cada planta, obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{\partial F}{\partial P_{gi}} = \frac{\partial}{\partial P_{gi}} \left[(f_1 + f_2 + \dots + f_k) + \lambda \left(P_L + P_D - \sum_{i=1}^k P_{gi} \right) \right] = 0 \quad (2.12)$$

Siendo que P_D es un valor fijo para una demanda en particular se tiene que:

$$\frac{\partial F}{\partial P_{gi}} = \frac{\partial f_i}{\partial P_{gi}} + \lambda \left(\frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}} - 1 \right) = 0 \quad (2.13)$$

Despejando λ de la ecuación 2.13.

$$\lambda = \left[\frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}} \right] \frac{\partial f_i}{\partial P_{gi}} \quad (2.14)$$

Notese que el termino $\partial f_i / \partial P_{gi}$ representa los costos marginales para un sistema sin pérdidas.

La expresión entre corchetes es el factor de penalización, y básicamente es el componente que cuantifica los costos reales que lleva aumentar en $1[MWh]$ la potencia de una planta de energía en un sistema con pérdidas. La denotación que se le asigna al factor de penalización es L_i . Este valor siempre es mayor a 1 considerando las pérdidas e igual a 1 para un sistema sin pérdidas.

$$L_i = \frac{1}{1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{gi}}} \quad (2.15)$$

Por consiguiente, el problema ahora se traslada en igualar los costos incrementales de las plantas de energía multiplicado por el factor de penalización de cada planta, como se describe en la ecuación 2.16:

$$L_1 \frac{\partial f_1}{\partial P_{g1}} = L_2 \frac{\partial f_2}{\partial P_{g2}} = L_i \frac{\partial f_i}{\partial P_{gi}} \quad (2.16)$$

Para el cálculo del factor de penalización se requiere hallar la matriz de pérdidas del sistema B , únicamente para hallar la derivada parcial de las pérdidas con respecto a la distribución de potencia en las barras con generación. La expresión general para obtener este término es el siguiente:

2.3. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA CON PÉRDIDAS

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_{g_i}} = 2B_{i1}P_{g1} + 2B_{i2}P_{g2} + \dots + 2B_{ik}P_{gk} + 2B_{i(k+1)} \quad (2.17)$$

A continuación se describe la metodología realizada para resolver un despacho con pérdidas, teniendo en cuenta el factor de penalización.

2.3.2 Metodología para la solución del despacho con pérdidas La metodología adoptada para el despacho con pérdidas no difiere mucho del despacho sin pérdidas realizado en la sección anterior. Todas las barras con generación son consideradas agentes del mercado y implementan la metodología de negociación. En esta oportunidad se introduce un parámetro de penalización, que refleja el costo adicional que tienen que pagar los generadores teniendo en cuenta las pérdidas por las líneas de transmisión. Al igual que se realizó en un despacho sin pérdidas, los agentes tienen como objetivo igualar sus costos marginales, introduciendo para este caso, el factor de penalización. Este factor denotado como L_i depende de una distribución de potencias activas en las plantas del sistema. La esencia de la metodología no cambia con respecto al despacho sin pérdidas, los agentes realizan negociaciones bilaterales con agentes del mercado con el objetivo de seguir el siguiente comportamiento:

$$L_n \frac{\partial f_n}{\partial P_{gn}} = L_m \frac{\partial f_m}{\partial P_{gm}} \quad (2.18)$$

$$P_n^{(k)} = P_m^{(k-1)} + P_n^{(k-1)} - P_m^{(k)} \quad (2.19)$$

Donde:

L_n : Factor penalización del agente n

L_m : Factor de penalización del agente m

Modo de negociación La forma matemática en que los agentes igualan sus costos marginales se describe y plantea a partir de las siguientes ecuaciones de costos marginales con pérdidas (CMCP) de dos agentes m y n como:

$$\lambda_n = L_n(a_n P_{gn} + b_n) \quad (2.20)$$

$$\lambda_m = L_m(a_m P_{gm} + b_m) \quad (2.21)$$

Donde:

Capítulo 2. SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO SIN Y CON PÉRDIDAS

λ_n : Costo marginal con pérdidas del agente n

λ_m : Costo marginal con pérdidas del agente m

Despejando las potencias P_{gn} y P_{gm} de las ecuaciones anteriores e igualando $\lambda_n = \lambda_m = \lambda$ se determina:

$$P_{gn} = \frac{\left(\frac{\lambda}{L_n} - b_n\right)}{a_n} \quad (2.22)$$

$$P_{gm} = \frac{\left(\frac{\lambda}{L_m} - b_m\right)}{a_m} \quad (2.23)$$

Ahora bien, la suma de las potencias generadas al inicio y final de la negociación tienen que ser las mismas, por consiguiente, $P_{gn} + P_{gm} = P_{gT}$. Despejando λ de la línea de ecuación anterior, tenemos que:

$$\lambda = a_T P_{gT} + b_T \quad (2.24)$$

Donde ahora los valores de a_T y b_T tiene implícito el factor de penalización como se muestra a continuación

$$a_T = \left(\frac{1}{L_n a_n} + \frac{1}{L_m a_m}\right)^{-1} \quad (2.25)$$

$$b_T = a_T \left(\frac{a_n}{b_n} + \frac{a_m}{b_m}\right) \quad (2.26)$$

Si se llegasen a violar los límites de potencia, los agentes reasignan una nueva potencia de generación. Suponiendo que el agente m sobrepasa los niveles de potencia aceptados, se calcula la potencia en el agente n de la siguiente manera:

$$P_n^{(k)} = P_m^{(k-1)} + P_n^{(k-1)} - P_m^{(k)}$$

Donde $P_m^{(k)} = P_{mLimit}^{(k)}$.

Esto implica también realizar una corrección en los costos marginales con pérdidas, que quedarían para ambos agentes de la siguiente forma:

$$\lambda_m = L_m(a_m P_{mLimit}^k + b_m) \quad (2.27)$$

2.3. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA CON PÉRDIDAS

$$\lambda_n = L_n(a_n P_n^k + b_n) \quad (2.28)$$

Esta es la metodología implementada para la interacción entre dos agentes del despacho con pérdidas. A continuación, se expone en forma general el desarrollo del algoritmo que implica la corrida de un flujo de potencia antes de entrar en las etapas de negociación.

Desarrollo del algoritmo El factor de penalización L_i se calcula mediante los elementos de la matriz de pérdidas B , a su vez, esta matriz B depende de las variables de salida para la solución de un flujo de cargas (S_i, V_i) . La metodología utilizada para hallar la matriz de pérdidas es la misma que se encuentra en el numeral 13.3 del libro (SAADAT, 1999). Cuando se conocen los factores de penalización L_i , estos se multiplican por la función de costos marginal inicial de la planta de generación, en este caso para una barra de generación i como:

$$\lambda_i = L_i \frac{\partial f_i}{\partial P_i}$$

Donde λ_i es el costo marginal con pérdidas de la barra de generación i . Con los costos marginales con pérdidas (CMCP) en cada una de las barras y la distribución inicial de potencia se realiza el proceso de negociación expuesto anteriormente. En otros términos, se realiza el despacho o la distribución económica de las potencias activas en las plantas del sistema. Cuando finalizan estas etapas de negociación básicamente se destacan los nuevos costos marginales (CM), costos marginales con pérdidas (CMCP) y la distribución de potencia activa en cada una de las barras.

Esta nueva distribución de potencia son asignadas a las barras PV del sistema, por ende no se mantienen los mismos resultados de solución del flujo de cargas planteado inicialmente. Esta variación en la solución del flujo implica cambios en los valores de los elementos de la matriz de pérdidas B y a su vez en el factor de penalización. Por consiguiente, se tienen nuevos costos marginales con pérdidas para el inicio de una nueva etapa de negociación.

Este proceso es iterativo y se repite el número de veces que sea necesario hasta que las diferencias en los costos marginales entre los agentes sea muy pequeña, según un criterio. Este criterio se toma con la potencia Slack en la solución del flujo y del despacho. La potencia activa obtenida en la barra Slack después de la negociación es la única que no se establece en el flujo. Por obvias razones. Esta potencia es utilizada para el criterio de parada para la solución del problema de optimización. Si las diferencias entre la potencia Slack distribuida en el despacho y la potencia Slack resuelta en el flujo se van haciendo cercanas, implícitamente también los costos marginales con pérdidas entre los agentes.

Capítulo 2. SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO SIN Y CON PÉRDIDAS

Por consiguiente, si las diferencias entre la potencia Slack del flujo y la potencia Slack del despacho es menor a una tolerancia asignada, se detiene el algoritmo (ver ecuación 2.29); de lo contrario, se tiene que volver a correr un nuevo flujo y realizar nuevas etapas de negociación.

$$|P_{S\text{flujo}}^{(k)} - P_{S\text{despacho}}^{(k)}| < \text{Tolerancia} \quad (2.29)$$

Donde:

$P_{S\text{flujo}}^{(k)}$: Potencia en la barra Slack obtenida en un flujo de cargas para la iteración k .

$P_{S\text{despacho}}^{(k)}$: Potencia en la barra Slack obtenida después de las negociaciones en la iteración k .

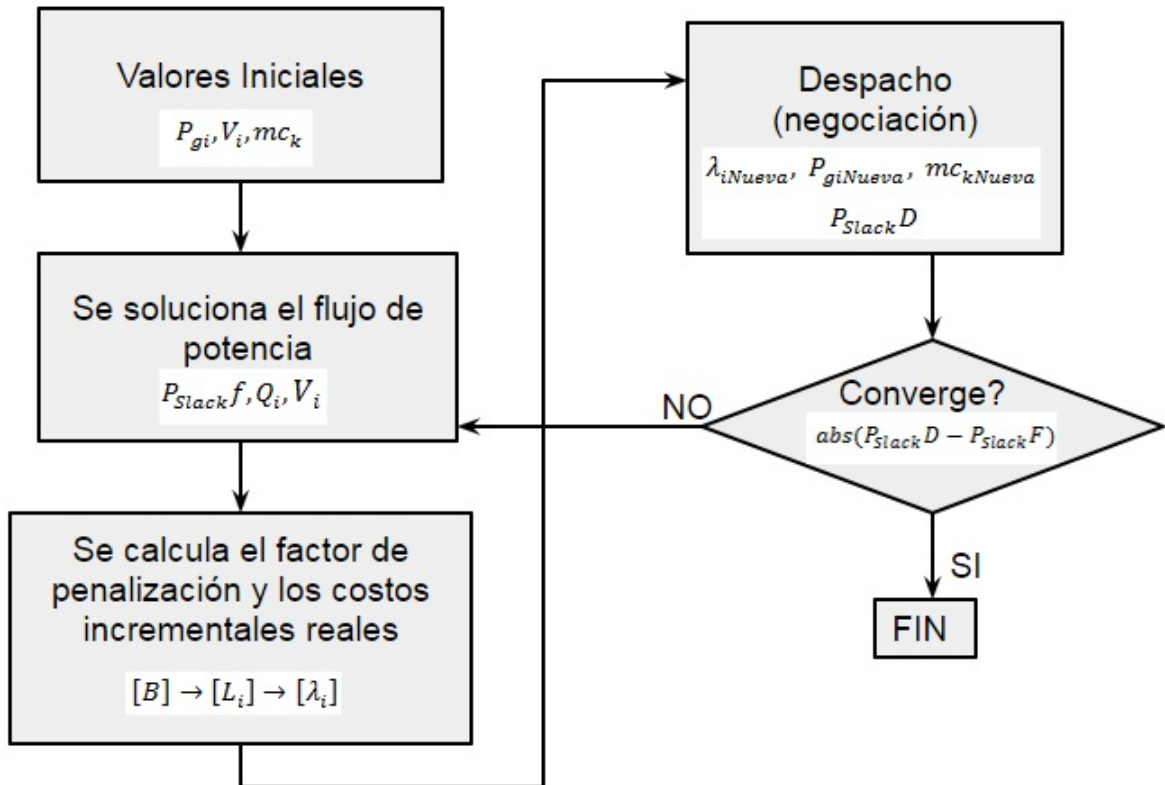
Estas etapas de negociación definen las nuevas variables de potencia activa tomadas para resolver flujo en una iteración $(k + 1)$. En la tabla tal se describe el algoritmo del despacho con pérdidas.

Tabla 2.3.: Algoritmo del despacho con pérdidas

```
Cargar datos finales del despacho sin pérdidas( $\lambda, P$ )
agentes: Número de agentes del despacho
negociantes: Número de agentes que ya han negociado.
While  $P_{S\text{flujo}} - P_{S\text{despacho}} > \text{Error}$ 
    Se corre un flujo de cargas ( $P_{S\text{flujo}}, S_i, V_i$ )
    Se halla ( $B \rightarrow L \rightarrow CMCP$ )
    Se inician etapas de negociación
    While agentes  $\neq$  negociantes
        Un agente  $m$  y  $n$  negocian.
        Implementan comportamientos de las ecuaciones 2.19 y 2.29.
        If  $P > P_{\text{máx}}$  or  $P \leq P_{\text{mín}}$ 
            Se establecen nuevas potencias  $P_n$  y  $P_m$ 
            Se establecen nuevos costos incrementales  $\lambda_n$  y  $\lambda_m$ 
        Potencia Slack de las negociaciones ( $P_{S\text{despacho}}$ )
    Finaliza el algoritmo.
```

2.3. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA CON PÉRDIDAS

Figura 2.7.: Diagrama de flujo del despacho con pérdidas



A continuación, se presenta la implementación de esta metodología en una plataforma multiagentes, tomando como referencia los sistemas de potencia del capítulo 7 del libro (SAADAT, 1999).

2.3.3 Implementación del despacho con pérdidas en el MAS La implementación del despacho con pérdidas se realiza con el mismo sistema de potencia de 5 barras del ejemplo del despacho sin pérdidas. Básicamente, está compuesto por 3 barras generadoras, incluyendo la barra slack. Es el mismo sistema encontrado en el libro (SAADAT, 1999), ejemplo 7.10. Ahora bien, en la plataforma multiagente al igual que el despacho con pérdidas se tienen tres agentes como lo son los agentes g , c y p respectivamente. Su función no cambia en relación al despacho sin pérdidas. El agente g o agente gerente es el encargado de comunicar los resultados finales de la negociación cuando han sido los óptimos. El agente controlador o agente c es quién recibe las ofertas, asigna negociadores y confirman que todos hayan participado al menos una vez por ronda. Y finalmente los agentes p , que son los agentes del despacho que realizarán la negociación. Sin embargo, a los agentes p , se le suman los agentes *nodo*, agentes

Capítulo 2. SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO SIN Y CON PÉRDIDAS

encargados de resolver el flujo. Donde el agente *nodo* es necesario cuando se quiera reasignar los valores de L_i al haber terminado el despacho y también genera un componente de comparación con las potencias slack que es el criterio de parada que se adoptó en la metodología del despacho con pérdidas.

Al inicio del código en JASON se ejecuta flujo de cargas, en base a unos valores iniciales, de tensión V_i y potencias generadas P_{g_i} . Básicamente, el código que se utiliza es el mismo expuesto en el capítulo de la implementación del flujo descentralizado. Posteriormente, en el ambiente se cargan los factores de penalización y los costos marginales con pérdidas, al ser calculadas con las variables de salida de la solución del flujo de cargas. Por consiguiente, hasta aquí solo ha ocurrido una interacción entre los agentes *nodo* y el ambiente.

Cuando termina el flujo y la tolerancia asignada es superada, el agente *g* es responsable de comunicarle al agente controlador y a los agente P que ya es momento de empezar negociaciones. Y se inicia el proceso del despacho. Los agentes P tienen acceso a su propio factor de penalización L_i y costo incremental λ_i , que en definitiva son los únicos datos de relevancia que en el momento les interesa y que adquieren del ambiente. Con estos datos los agentes de despacho tienen información de su costo real de operación con las condiciones dadas al inicio del flujo. Las líneas del código de *Java* (ambiente) es donde el agente puede acceder a su información. Información que es local a la que solo puede acceder él. En la Tabla 2.4 se puede observar la interacción entre los agentes *p* y el ambiente para conocer sus costos marginales. El agente P tiene el plan "+!preguntamc" para conocer sus costos marginales y pregunta por sus costos marginales "?marginalcost(M)", y de acuerdo al valor que se encuentre en el ambiente se agrega el precepto en forma de creencia en el agente. En *Java* se observa que las líneas del código "addPercept" son para agregar el precepto al agente en cuestión que en este caso son cada uno de los participantes.

Tabla 2.4.: Interacción entre el agente *p* y el ambiente para el conocimiento de los costos marginales

Agente <i>p</i>	Líneas del código de JAVA
@preguntamc +!preguntamc :true <- preguntamcost; ?marginalcost(M).	if .equals("preguntamcost")) { addPercept(agName, Literal.parseLiteral ("marginalcost ("+lamda.get(agName)+")"));

Cuando los agentes P tienen las creencias de los costos marginales con pérdidas, están listos para la negociación. El agente *c* es quien gestiona, administra y coordina la negociación entre los agentes P. Realiza las mismas funciones al igual que el despacho sin pérdidas. Básicamente

2.3. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA CON PÉRDIDAS

hace una asignación aleatoria de uno de los agentes P del despacho y lo escoge como iniciador. Posteriormente, evalúa las diferencias entre el iniciador y los demás agentes del mercado, y con quién encuentre la mayor diferencia en los costos marginales incrementales lo asigna como el ganador. El agente c les establece al iniciador y ganador que deben efectuar la negociación. (Anteriormente se generó una comunicación entre el agente controlador para recibir las ofertas de los participantes del despacho al igual que se hizo para el despacho sin pérdidas.) El código del agente c en JASON en donde hace la asignación de los negociadores y gestiona el control sobre estas etapas de negociación es el siguiente

```
@lc1[atomic]
+!contract
: contrate
<- -+cnp_state(contract);
  .findall(offer(Offer,A),propose(Offer,Me)[source(A)],LL);
  ?participantes(Particip);
  ?iniandwin(IniWin);
  .difference(Particip,IniWin,Faltan);
  .shuffle(Faltan,Shuffle_Participants);
  .nth(0,Shuffle_Participants,Participant_INI);
  mayor(LL,Participant_INI);
  L \== [];
  .max(L,offer(WOf,WAg));
  .union([Participant_INI,WAg],IniWin,Iniwinn);
  -+iniandwin(Iniwinn);
  -+cnp_state(finished);
  !anuncio(WAg,Participant_INI,Particip).
```

En esta parte del código del agente C en JASON se realiza parte de las funciones que hasta ahora se han mencionado de este agente (*Contract Net Protocol*). La primera línea del código muestra que es un plan atómico, esto significa que mientras el agente este ejecutando este plan, no le pueden llegar más datos que vuelvan a lanzar el plan, hasta que no haya terminado su meta. Posteriormente, en la tercera línea encuentra todas las ofertas que fueron enviadas por los participantes, en la décima línea selecciona aleatoriamente un iniciador, en la once se evalúan las diferencias (En el entorno) de los costos marginales entre el iniciador y los participantes .Y en la doceava línea selecciona la mayor diferencia y lo nombra como el agente ganador.

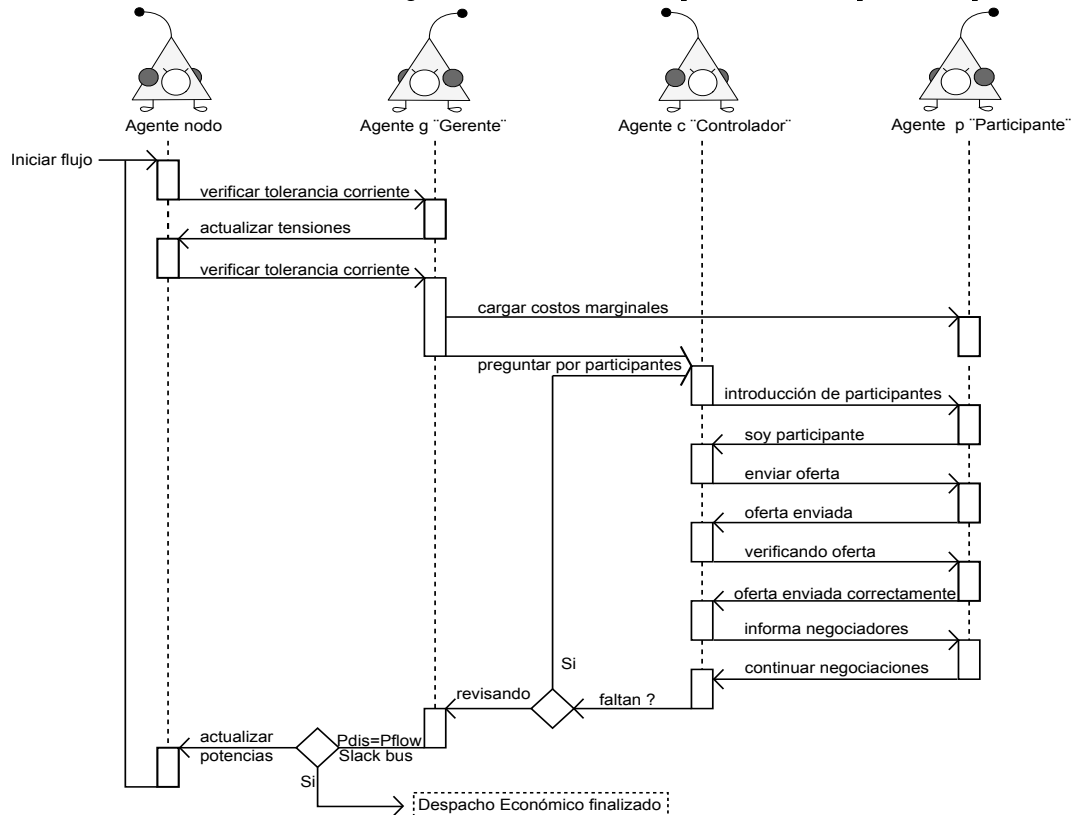
Capítulo 2. SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO SIN Y CON PÉRDIDAS

Seguidamente cuando el agente c ejecuta el llamado *Contrat Net Protocol*, anuncia a los agentes del despacho quien es el iniciador y el ganador. Estos empiezan la negociación y cuando la terminan establecen sus nuevos costos marginales con pérdidas y sus potencias activas. El proceso del *Contrat Net Protocol* se realiza hasta que todos los participantes hayan realizado por lo menos una negociación.

Cuando ha terminado la etapa de negociación el agente gerente o agente g , establece si las diferencias entre la potencia generada en la slack de flujo y la de despacho son cercanas a cero. De lo contrario le asigna al agente *nodo* que vuelva a correr el flujo con la potencia redistribuida y costos marginales hallados en el despacho, por consiguiente, se efectúa una nueva iteración. Cuando la tolerancia sea menor a la asignada el problema será solucionado y el óptimo se determinará.

El siguiente diagrama muestra las interacciones que se da entre los diferentes agentes que funcionan en el despacho con pérdidas. Y en la Figura 2.9 se observan los datos de salida para el sistema de 5 barras implementado en el MAS, sin embargo, en el siguiente capítulo se resumen los resultados para la implementación de los problemas de flujo descentralizado, despacho sin pérdidas y despacho con pérdidas.

Figura 2.8.: Interacciones entre todos los agentes involucrados en el problema de despacho con pérdidas



2.3. OPERACIÓN ECONÓMICA EN SISTEMAS DE POTENCIA CON PÉRDIDAS

Agente nodo- Agente g . El agente gerente es quien evalúa las I_{dif} de cada uno de los agentes *nodo*, hasta que encuentra un valor apropiado y ordena al agente c ejecutar despacho.

Agente g - Agente c . El agente c gestiona las etapas de negociación y cuando todos hayan negociado pregunta a g el las diferencias en el valor entre la potencia para la barra slack determinado en el flujo y en el despacho. Implícitamente evalúa si las diferencias en los costos marginales con pérdidas (CMCP) es cercana a cero.

Agente g - Agente nodo Si las diferencias entre las potencias de flujo y despacho en la slack no son menores a una tolerancia establecida el agente g vuelve y ordena a flujo ejecutarse con los valores actualizados en el despacho.

Agente g El proceso es iterativo hasta que g establece que los valores ya han sido los óptimos.

Observaciones Inicialmente la metodología adoptada para la designación bilateral de los negociantes en la plataforma multiagentes (MAS) realizada por el agente c , consistía en escoger aleatoriamente un agente iniciador y posteriormente otro agente con el que tuviera la menor diferencia en costos marginales con pérdidas. Al implementarlo en el sistema de 26 barras se observó que se obtenían valores óptimos locales. Los costos marginales con pérdidas (CMCP) de dos grupos de generadores eran los mismos, y de esta manera no se lograba igualar los costos marginales de todos los participantes. De manera que se la asigno al iniciador, otro negociante con el que tuviera la mayor diferencia en sus costos marginales. Cuando se implementa de esta forma se obtuvo un valor óptimo global y por consiguiente se lograba igualar los costos marginales con pérdidas (CMCP) de los agentes del mercado.

Figura 2.9.: Sistema multiagente en JASON. A la izquierda se puede observar parte de la estructura del código de JASON en el agente c y a la derecha la solución al sistema de 5 barras.



CAPÍTULO 3

RESULTADOS

En este capítulo se resumen los resultados de los problemas de sistemas de potencia implementados en una plataforma multiagente. Principalmente, los problemas de flujos de cargas, despacho económico sin pérdidas y despacho económico con pérdidas. La interpretación de los resultados se hace más legible tomando como herramientas tablas y graficas que permiten un mejor análisis. Los problemas abordados se implementan en dos sistemas de potencia, uno de 5 barras y otro de 26 barras.

Se podrán observar los parámetros de salida de la solución de problemas basados en la filosofía descentralizada. En los anexos se encuentra la solución de estos mismos problemas de flujo y de despacho de manera centralizada. Aquí se contrastaran algunos datos para ambas formas de solución (descentralizado y centralizado). Inicialmente, se muestran los resultados de la implementación del flujo descentralizado en el MAS, de los sistemas de 5 y 26 barras. Posteriormente, se encuentran los datos de salida para los sistemas anteriores en la implementación del despacho sin pérdidas. Seguidamente se utilizan gráficas para describir el comportamiento que se obtiene en un despacho con pérdidas, permitiendo realizar contrastes con respecto al despacho con pérdidas resuelto de manera centralizada. Posteriormente se encuentra los resultados de un sistema de 5 barras en los que violaban los límites de potencia en la etapa de negociación. Al final del capítulo se encuentre el tiempo de computo utilizado para un sistema de 5 barras.

3.1 SOLUCIÓN PARA EL FLUJO DESCENTRALIZADO

En la Tabla 3.1 se resume el resultado obtenido para la solución al flujo descentralizado en JASON, para el sistema de potencia de 5 barras. Se puede realizar comparaciones en la solución de ambos métodos (centralizado y descentralizado) . Los datos en forma general fueron muy similares y tienden en algunos parámetros ser el mismo valor. En particular para el sistema de 5 barras los datos fueron exactamente los mismos. En el anexo de solución al flujo centralizado se pueden encontrar los datos de salida para el mismo sistema de 5 barras. Sin embargo, también se pueden encontrar estos datos en el libro (SAADAT, 1999), capítulo 7, ejemplo 7.9, que es la fuente original donde se tomó este sistema de 5 barras como referencia. A continuación, se presentan los datos de la solución del flujo resuelto de manera descentralizada para este sistema de 5 barras con una base en potencia de 100[MW]. En la gráfica de barras de la Figura 3.1, se hace una comparación de las potencias generadas del flujo descentralizado, resuelto en el MAS, y resuelto en *Power World*¹. La barra gris oscura y clara representan los valores resueltos en el MAS y *Power World* respectivamente.

Tabla 3.1.: Resultados del flujo de cargas 5 barras en JASON.

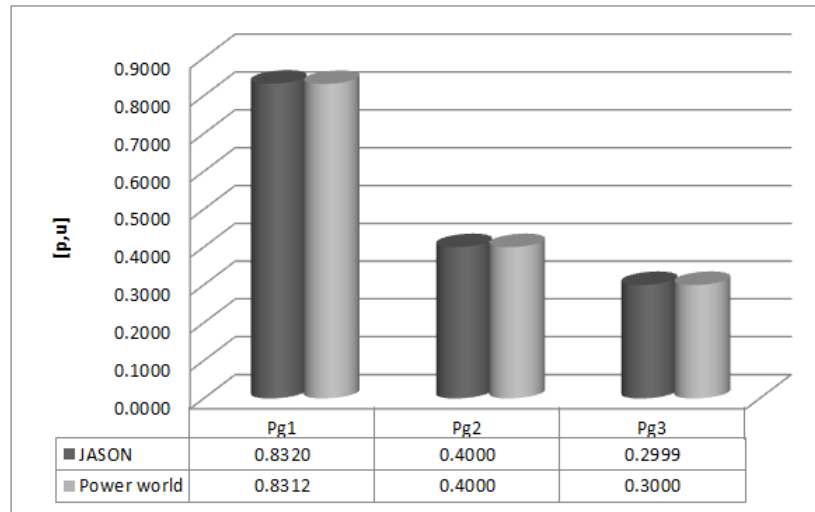
Parámetros	Tensión [p.u],[grados]		Potencia generada [p.u]		Potencia demandada [p.u]	
Barra	Mag	Áng	Pg	Qg	Pd	Qd
1	1.06	0.000	0.832	0.138	0.00	0.00
2	1.0436	-1.766	0.400	0.500	0.20	0.10
3	1.0300	-2.505	0.2999	0.101	0.20	0.15
4	1.0105	-3.122	0.000	0.000	0.50	0.30
5	0.9863	-4.368	0.000	0.000	0.60	0.40
Potencia total generada [p.u]			1.5319	0.739		
Carga total [p.u]					1.50	0.95
Potencia de pérdidas [p.u]				0.0319		

Por otra parte, para el sistema de potencia de 26 barras, compuesto por 5 barras PV, 20 barras PQ y la Slack, arrojan datos muy similares por ambos métodos (centralizado y descentralizado). En el desarrollo del flujo descentralizado se tomó una base de potencia de 100[MW] y se tomó como referencia el ejemplo 7.11 del libro (SAADAT, 1999). Desde allí se puede

¹Herramienta computacional que en su versión gratuita permite realizar flujos de carga en un sistema de hasta 13 barras

3.1. SOLUCIÓN PARA EL FLUJO DESCENTRALIZADO

Figura 3.1.: Gráficas de las potencias generadas en JASON y Power World.



extraer cualquier dato necesario para la solución del flujo. Entre estos, las características de las líneas, las tensiones en las barras PV y Slack y la carta de potencia de los generadores. El esquema del sistema se puede observar en los anexos de flujo centralizado. A continuación, se presentan los datos de interés en la solución del flujo presentados en la Tabla 3.2. En esta tabla se incluyen los datos de potencia y tensión solo en las barras con generación, barras PV y la barra Slack. Si se quiere información de las tensiones y potencias en todas las barras se puede consultar la sección de anexos de flujo centralizado en donde se incluyen estos datos, en la que los datos son exactamente los mismos.

Tabla 3.2.: Tensión y potencia generada para el sistema de potencia de 26 barras

Barra	Parámetros			
	Tensión		Potencia	
	Mag	Áng	Pg	Qg
1	1.060	0.00	7.21	-3.58
2	1.020	-1.13	0.79	7.00
3	1.025	-4.42	0.20	0.24
4	1.050	-3.85	1.00	0.74
5	1.045	0.85	3.00	1.51
6	1.015	-2.05	0.60	-0.38

3.2 SOLUCIÓN AL DESPACHO DESCENTRALIZADO SIN PÉRDIDAS

Para la solución del despacho sin pérdidas se tomó como referencia el mismo sistema de potencia de 5 barras referenciado anteriormente (SAADAT, 1999), en el ejemplo 7.6, compuesto al igual que el ejemplo del flujo de dos barras PV, dos PQ y la slack. De igual manera se realizó la solución con la *toolbox* de *Matpower*, establecidos en el anexo de la solución de problemas centralizados. Tomando como referencia este sistema, se resuelve exactamente el mismo en el MAS, considerando la misma topología y los mismos valores de entrada, entre estas, la función de costos de cada una de las plantas generadoras, considerando también la carta de potencia de los generadores. A continuación, se muestran las funciones de costos correspondientes a las tres plantas generadoras y su límite de generación.

$$C_1 = 500 + 5,3P_1 + 0,004P_1^2 \text{ y } 200 \leq P_1 \leq 450$$

$$C_2 = 400 + 5,5P_2 + 0,006P_2^2 \text{ y } 150 \leq P_2 \leq 350$$

$$C_3 = 200 + 5,8P_3 + 0,009P_3^2 \text{ y } 100 \leq P_3 \leq 225$$

Los resultados al despacho sin pérdidas resuelto de manera descentralizada fueron exactamente los mismos, ambos métodos convergen a los mismos costos marginales, a la misma distribución de potencia activa y por consiguiente a los mismos costos totales del sistema [\$/h]. A continuación, se presenta los resultados finales.

Tabla 3.3.: Distribución de las potencias, costos marginales y costos totales para el sistema de 5 barras

Barra	Tipo de barra	Potencia generada [MW]	Costos marginales [\$/MWh]	Costos[\$/h]
1	Slack	400	8.5	3260.0
2	PV	250	8.5	2150.0
3	PV	150	8.5	1272.5
Costo marginal del sistema[λ]			8.5	
Costos totales [\$/h]				6682.5

Para la solución del despacho sin pérdidas del sistema de 26 barras básicamente se toman los mismos datos del ejemplo 7.11 del libro (SAADAT, 1999). Este despacho se resuelve con la finalidad de determinar valores de entrada iniciales (costo marginal) para resolver el despacho

3.3. SOLUCIÓN AL DESPACHO DESCENTRALIZADO CON PÉRDIDAS

con pérdidas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos al resolver el despacho sin pérdidas en el MAS.

Tabla 3.4.: Datos del despacho sin pérdidas para el sistema de 26 barras

Barra	Tipo de barra	Potencia generada [MW]	Costos marginales [\$/MWh]
1	Slack	448.80	13.297
2	PV	157.75	13.297
3	PV	266.51	13.297
4	PV	127.62	13.297
5	PV	174.82	13.297
6	PV	86.48	13.297
Costo marginal del sistema [\$/MWh]			13.297
Costos totales [\$/h]			15325

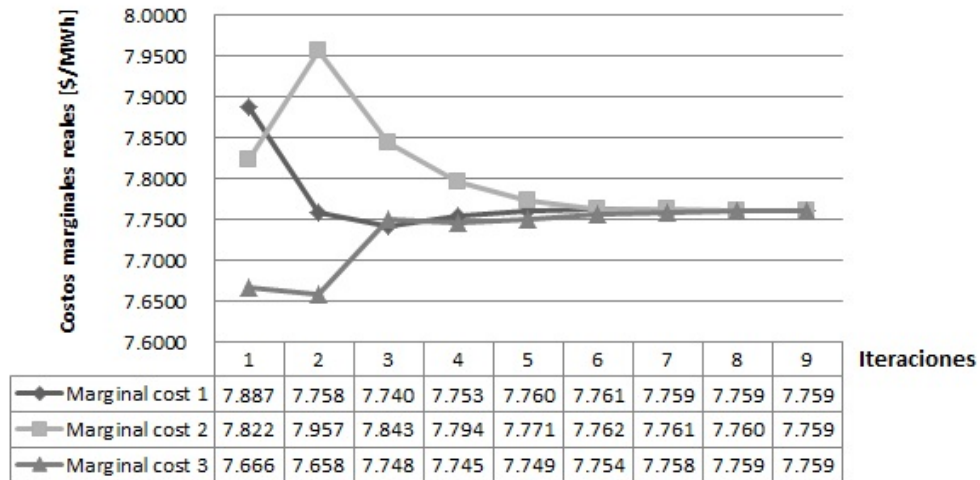
3.3 SOLUCIÓN AL DESPACHO DESCENTRALIZADO CON PÉRDIDAS

La implementación del despacho de energía con pérdidas para los sistemas de 5 y 26 barras, tiene un número mayor de parámetros que analizar en comparación a los problemas de flujo y de despacho sin pérdidas. Entre estos parámetros están los CMCP, donde se tiene en cuenta el factor de penalización, que se introduce básicamente por las pérdidas que genera cada planta en el sistema. Por consiguiente, se toma una rama más amplia de resultados para comparar y analizar con respecto a la solución de despacho con pérdidas resuelto de manera centralizada.

En el desarrollo del sistema de 5 barras, los resultados de cada etapa de negociación son mostrados en la Figura 3.2 , donde los CMCP para la sexta iteración son aproximadamente iguales. Los costos marginales de 1,2 y 3 representan las barras Slack y las dos siguientes barras PV. La tendencia muestra que en cada iteración los valores se asemejan mucho más.

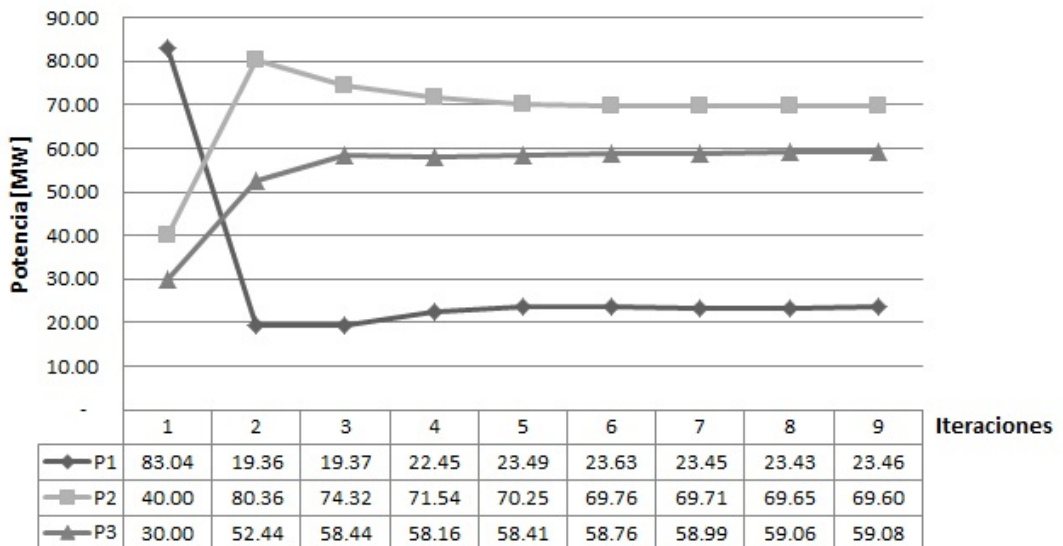
Capítulo 3. RESULTADOS

Figura 3.2.: CMCP en el sistema de 5 barras



Con estos costos marginales calculados por cada uno de los agentes del despacho, se puede realizar la distribución de las potencias activas que suministrarían las plantas. A continuación, en base al costo incremental real de la figura anterior, en la Figura 3.3, se describe la variación en las potencias activas en cada una de las plantas generadoras por cada iteración.

Figura 3.3.: Distribución de potencias activa para el sistema de 5 barras

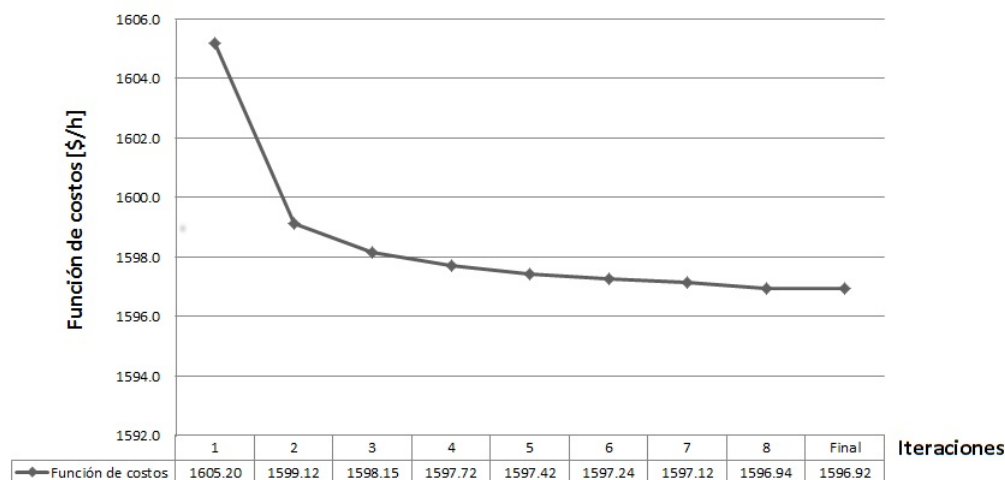


Por consiguiente, conociendo la carga en la planta y la curva de costos asociada a cada una de ellas, se puede describir un comportamiento de costos a través de las iteraciones. En don-

3.3. SOLUCIÓN AL DESPACHO DESCENTRALIZADO CON PÉRDIDAS

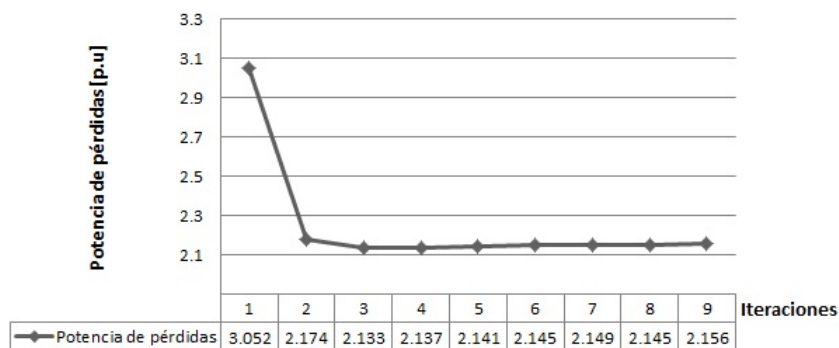
de, el principal objetivo es atacar la función de costos haciendo que sea lo menor posible. En la Figura 3.4 se observa que los costos globales del sistema se van reduciendo constantemente, presentando el mayor impacto en las dos primeras iteraciones, posteriormente, se va reduciendo la pendiente de la curva tendiendo al mismo valor.

Figura 3.4.: Función de costos para las plantas del sistema de 5 barras



Otro parámetro referenciado corresponde a la potencia de pérdidas. Esta potencia con respecto a los datos iniciales presenta un decrecimiento. Sin embargo, al optimizar la función de costos, la potencia de pérdidas en el sistema no es la óptima, tiene una reducción significativa, empero, no es la menor. Como se ilustra en la Figura 3.5 se obtiene las menores pérdidas en la iteración 3. Posteriormente, este valor aumento hasta tender a un valor constante.

Figura 3.5.: Potencia de pérdidas en el sistema de 5 barras



A continuación, en la Tabla 3.5 se resumen algunos de los parámetros ya mencionados ante-

Capítulo 3. RESULTADOS

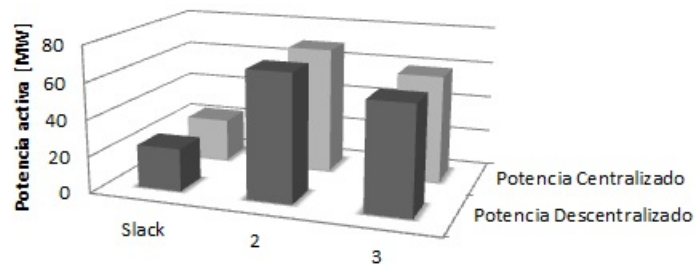
riormente. Los costos marginales representan los costos asociados sin tener en cuenta el factor de penalización. Nótese, que el mayor factor de penalización se presenta en la barra Slack, que geográficamente es la que más se encuentra alejada de las barras PQ, donde se encuentra la mayor concentración de carga. Por consiguiente, puede que su costo marginal sea más bajo pero multiplicado por este factor de penalización, se cuenta con los costos reales que requiere en aumentar en $1[MW/h]$ la potencia de esta planta.

Tabla 3.5.: Parámetros generales del sistema de 5 barras en el despacho con pérdidas

Parámetros				
Barra	Costo marginal $mc_i [$/MWh]$	Factor de penalización L_i	Costo marginal real $\lambda_i [$/MWh]$	Potencia activa $P_{gi} [MW]$
Slack	7.375	1.052	7.760	23.461
1	7.553	1.027	7.760	69.600
2	7.627	1.017	7.760	59.083

Finalmente, en contraste con los valores finales del despacho resuelto en forma centralizada se obtiene, el CMCP de $7,76[$/MWh]$ para el caso descentralizado y $7,759[$/MWh]$ para el sistema resuelto en forma centralizada. Y la distribución de potencias por ambos métodos coinciden como se puede observar en la Figura 3.6.

Figura 3.6.: Distribución de potencias para el despacho resuelto de manera Centralizada y Descentralizada

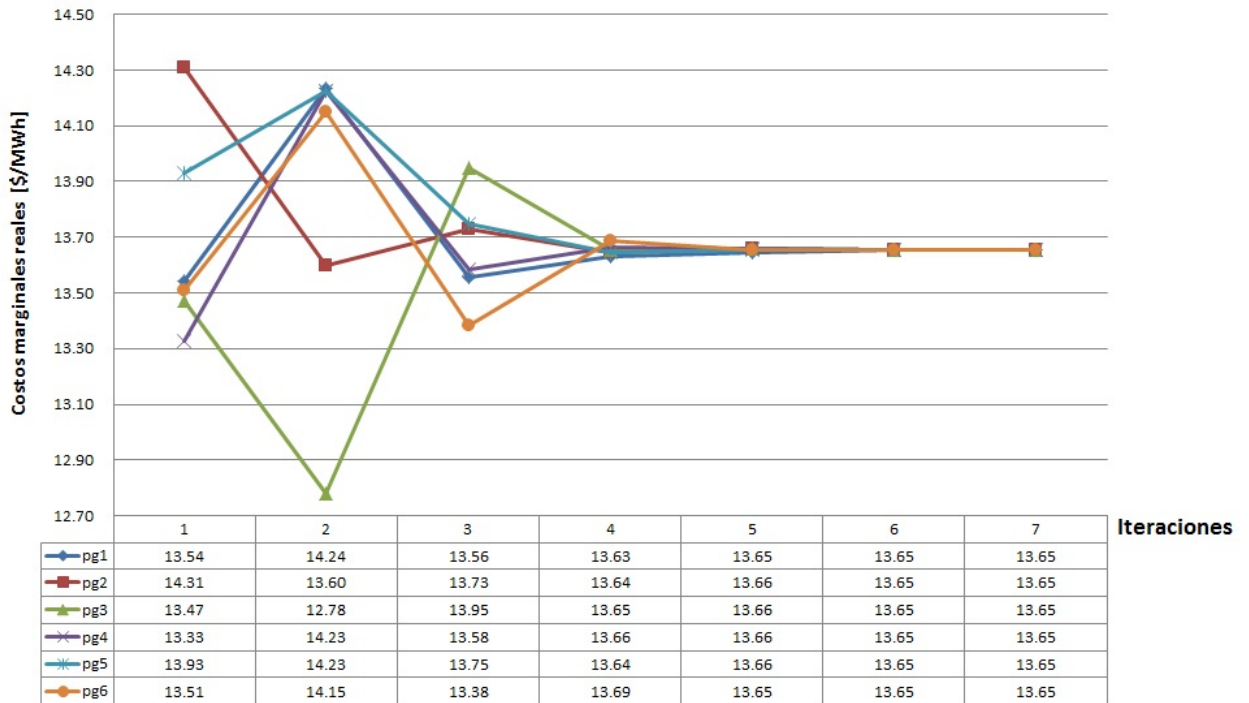


	Slack	2	3
■ Potencia Descentralizado	23.461	69.600	59.083
■ Potencia Centralizado	23.558	69.550	59.030

La misma metodología y análisis fue aplicada para el sistema de 26 barras, donde los costos incrementales reales al igual que para el caso del sistema de 5 barras tienden a un mismo valor, como se puede observar en la Figura 3.7.

3.3. SOLUCIÓN AL DESPACHO DESCENTRALIZADO CON PÉRDIDAS

Figura 3.7.: Costos incrementales para el sistema de 26 barras. Donde los CMCP al igual que para el caso del sistema de 5 barras tienden a un mismo valor



A medida que se reducen las diferencias entre los costos incrementales reales de los agentes del despacho del sistema de 26 barras, se reducen los costos totales de generación en cada iteración, como se puede observar en la Figura 3.8. De igual manera, en la Tabla 3.6 se observa la distribución de potencia en cada una de las barras, los factores de penalización y los costos marginales. Cabe resaltar que para un sistema de despacho sin pérdidas el factor de penalización es 1.

Capítulo 3. RESULTADOS

Figura 3.8.: Costos en el despacho con pérdidas para el sistema de 26 barras

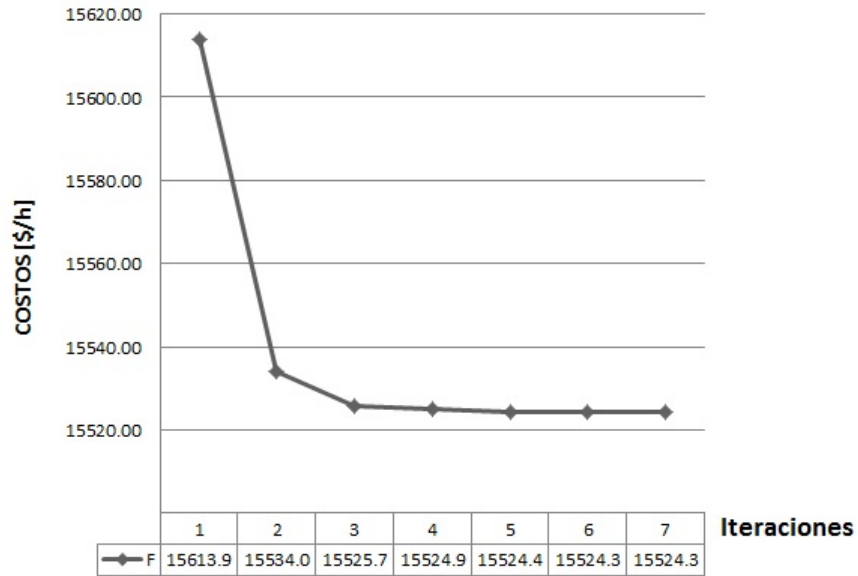


Tabla 3.6.: Parámetros generales del sistema de 26 barras en el despacho con pérdidas

Barra	Parámetros			
	Costo marginal mc_i [\$/MWh]	Factor de penalización L_i	Costo marginal real λ_i [\$/MWh]	Potencia [MW]
Slack	13.482	1.07	13.65	459.12
2	13.067	1.045	13.65	145.65
3	13.381	1.020	13.65	271.15
4	13.588	1.005	13.65	143.77
5	13.152	1.038	13.65	165.77
6	13.382	1.020	13.65	92.10

Depacho con pérdidas forzando límites de potencia Para el sistema de 5 barras utilizado durante el desarrollo del proyecto se realizó una prueba de verificación de los límites de potencia, estableciendo en la barra 2 una potencia máxima de 60[MW]. Como era de preverse los costos marginales de los agentes del despacho no convergieron a un mismo valor generando costos globales mayores, en comparación con el sistema cuando no se forzaban los límites de potencia. Los resultados pueden ser vistos en la Figura 3.9.

Figura 3.9.: Resultados del sistema de 5 barras forzando límites de potencia.

The screenshot shows the Eclipse IDE interface. The top part is the MAS console, displaying the results of a simulation. The bottom part is a code editor showing the configuration for the MAS environment.

MAS Console Output:

```

MAS Console - limittcp
[envlimitcp] PV BUS Generation in nodo3 : Pg = 0.6214022459555992 y Qg = 0.130436333953197417
[envlimitcp] Slack BUS Generation in nodo1 : Pg = 0.3002989004669202 y Qg = 0.23648023331455392
[gi] Current Surplus Difference : 1.1100300413238749E-6
[gi] Run Power Flow
[envlimitcp] Slack BUS Generation in nodo1 : Pg = 0.3002985624532798 y Qg = 0.23648034288580545
[envlimitcp] PV BUS Generation in nodo2 : Pg = 0.5999999999999994 y Qg = 0.3392519893699178
[envlimitcp] PV BUS Generation in nodo3 : Pg = 0.6214022459555992 y Qg = 0.13043629383781186
[gi] Current Surplus Difference : 9.850753565761212E-7
PL = 2.1805254924850037 [MW]
[envlimitcp] Penalty Factor: {p1=1.0457160531503114, p2=1.028536000573748, p3=1.01801586979119}
[envlimitcp] Marginal Cost: {p1=7.4815761061538195, p2=7.38, p3=7.669963144337839}
[envlimitcp] Global Marginalcost =Mc(i)*L(i) : {p1=7.823604237070847, p2=7.590595684234261, p3=7.808144201649456}
[envlimitcp] Pg Dispatch : {p1=30.02985624532798, p2=59.999999999999995, p3=62.140224595559935}
[gi] Power Flow OK
[ci] Waiting participants...
[ci] Sending CFP to {p3,p2,p1}
[ci] Initiator And Winner Agents : []
[ci] Remaining participants : {p1,p2,p3}
[ci] Marginal costs offers :
[offer] {7.808144201649456,p3},offer {7.590595684234261,p2},offer {7.823604237070847,p1}]
[ci] Initiator agent : p2
[ci] Winner agent : p1
[envlimitcp] Initiator in limit max
[envlimitcp] Initiator in limit max
[envlimitcp] Initiator in limit max
[ci] Waiting participants...
[ci] Sending CFP to {p3,p2,p1}
[ci] Initiator And Winner Agents : {p1,p2}
[ci] Remaining participants : {p3}
[ci] Marginal costs offers :
[offer] {7.808144201649456,p3},offer {7.590595684234261,p2},offer {7.822455616044748,p1}]
[ci] Initiator agent : p3
[ci] Winner agent : p2
[envlimitcp] Winner in limit max
[envlimitcp] Winner in limit max
[envlimitcp] Winner in limit max
[envlimitcp] mc : {p1=7.480477699925247, p2=7.38, p3=7.669963144337839}
[envlimitcp] lambda : {p1=7.822455616044748, p2=7.590595684234261, p3=7.808144201649456}
[envlimitcp] Total Costs : 1597.40671168553
[gi] ECONOMIC DISPATCH WITH LOSSES FINISHED
    
```

Code Editor Content (limittcp.envlimitcp):

```

1 MAS limittcp {
2
3   infrastructure: Centralised
4
5   environment: limittcp.envlimitcp
6
7   agents:
8     c;
9     g;
10    p #3;
11    nodo #5;
12
13   as1SourcePath:
14     "src/as1";
15
16 }
    
```

File Explorer:

- contractNetprotocol
- despacho26b
- despacho26sinper
- despachocp
- despachosp
- flowMAS
- flowMASac
- gauss1
- gauss5barras
- limitconperd
- src/as1
- src/java
- limitcp
 - envlimitcp.java
 - Parameters.java
- json.jar - C:\Program Files (x86)\JSON\json.jar
- flanagan.jar - C:\Program Files\Java\jdk1.8.0_05
- bin
- src
- limitconperd.masz

Bottom Bar: limittcp.Parameters.java - limitconperd/src/java

3.4 TIEMPO DE CÓMPUTO

Para medir el rendimiento de un programa o sección de código se utiliza esta variable del tiempo de cómputo. Básicamente, es el tiempo que requiere la herramienta computacional para solucionar el problema, o el tiempo de CPU empleado por el computador². Este tiempo inicia al momento de ejecutar el programa y finaliza al momento en que este envía una señal de terminación normal (solución al despacho), o una terminación anormal en el que el programa produjo algún error y se forzó su finalización. Para el sistema de 5 barras se tomaron en total 92 muestras. 30 de las muestras tuvieron una finalización normal y 62 una finalización anormal, esta última se presentaba al empezar a ejecutar el programa. Seguidamente, se ejecutó el código del mismo sistema de 5 barras, dejando un intervalo de tiempo de 100[ms] entre la ejecución del código del flujo y la de despacho. Para esta oportunidad el número total de muestras es de 30 con finalización normal y ninguna para finalización anormal. El tiempo computacional se calcula como el valor promedio del conjunto de valores que presentaron una finalización normal, para los dos casos anteriormente mencionados de 30 muestras. A continuación, se presenta la Tabla 3.7 con los datos pertinentes para el análisis de estos resultados.

Tabla 3.7.: Tiempo de cómputo para el sistema de 5 barras

Evento	Número de muestras		Int. de ejecución [ms]	Tiempo	
	Normales	Anormales		Promedio total [s]	Promedio de computo [s]
1	30	62	0	36.46	36.46
2	30	0	100	190.80	34.94

A continuación, se concluyen los puntos más importantes desarrollados.

²Las características del PC empleado fueron las siguientes. Un portátil TOSHIBA Satellite L745 con un procesador Intel Core i3-2310M 2.1Ghz y memoria RAM de 4 GB.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

La metodología presente en los mercados de energía actuales hace necesario que se requiera de un alto flujo de información, controlada en forma central, donde el operador tiene como función establecer el despacho en el sistema. Dada la demanda cambiante y la necesidad de optimizar los recursos directamente en el despacho de energía, se determinó que es posible reducir las acciones de cómputo implementando un mercado de generación distribuida donde el agente recoge solo la información del sistema que es de su interés. Por esta naturaleza, los cálculos a realizar podrían requerir menor tiempo de ejecución reduciendo el costo computacional. En el capítulo de resultados se evidencia para los circuitos de prueba seleccionados que la metodología de comunicación y solución distribuida es óptima. Cabe resaltar, que el tiempo de cómputo para el sistema multiagente en su mayor medida es debido a la solución del flujo de carga.

El uso irracional de la energía y la contaminación del medio ambiente son problemas que se pueden solucionar con las características inherentes que traen consigo los sistemas de generación distribuida en su competencia o asociación en el uso de fuentes no convencionales de energía, por tanto el sistema multiagente presenta una opción de solución descentralizada para estos sistemas.

Como resultado de la investigación se puede concluir que la metodología de cálculo distribuida implementada encuentra el óptimo por medio negociaciones bilaterales en el mercado, demostrando la eficacia del método. Esto se realiza sin intervención directa de un organismo que lo controle o conozca las curvas de costos marginales. No obstante, se necesita en el caso en el que se consideraron las pérdidas del sistema, un organismo que conozca todos los parámetros del sistema y estado de la generación y demanda, puesto que no fue posible descentralizar el

Capítulo 4. CONCLUSIONES

cálculo de los factores de penalización.

Cabe resaltar que para probar el método en su funcionamiento ideal, se requiere implementar con las características del sistema multiagente, distribuir el cálculo en diferentes computadores y establecer si los tiempos de ejecución mejoran. Otro aspecto a tener en cuenta es que cuando se violan los límites de potencia en los generadores, los CMCP no podrán igualarse, de tal manera que los costos globales del sistema aumentan.

BIBLIOGRAFÍA

- BORDINI, RAFAEL H. 2007. *Programing multi-agent systems in AgentSpeak using Jason*.
- BOYD, STEPHEN. 2008. Notes on Decomposition Methods. *Notes for EE364B, Stanford University*, April.
- CAI, NIANNIAN; THI, NGUYEN; THANH NGA Y MITRA J. 2012 (Sept). Economic dispatch in microgrids using multi-agent system. *Pages 1–5 of: North American Power Symposium (NAPS)*.
- DIMEAS, AL Y HATZIARGYRIOU, N. 2004 (June). A multiagent system for microgrids. *Pages 55–58 Vol.1 of: Power Engineering Society General Meeting. IEEE*.
- GRAINGER, JOHN J Y STEVENSON, WILLIAM D. 1996. *Ánàlisis de sistemas de potencia*.
- SAADAT, HADI. 1999. *Power System Analysis*. McGraw-Hill.
- XM. 2014 (Octubre). *Informe Precios y Transacciones*.

ANEXOS

ANEXOS A

SOLUCIÓN AL FLUJO DE POTENCIA DE FORMA CENTRALIZADA

La solución del flujo de cargas de un sistema de potencia es el tema más básico, y esencial para el análisis de los sistemas. En éste anexo, se presenta la solución al flujo de potencia centralizado en 2 sistemas. El primero en un sistema de 5 barras y el segundo de 26 barras, resueltos en *Power world* y Matlab, con la *toolbox MATPOWER* respectivamente¹,

El sistema de 5 barras Se puede observar en la Figura A.1. En este esquema se pueden apreciar las tensiones en las barras, las potencias generadas y demandadas en cada barra y la conexión entre éstas. Además, en la Tabla A.1 se muestran estos mismos parámetros con la solución al flujo de carga.

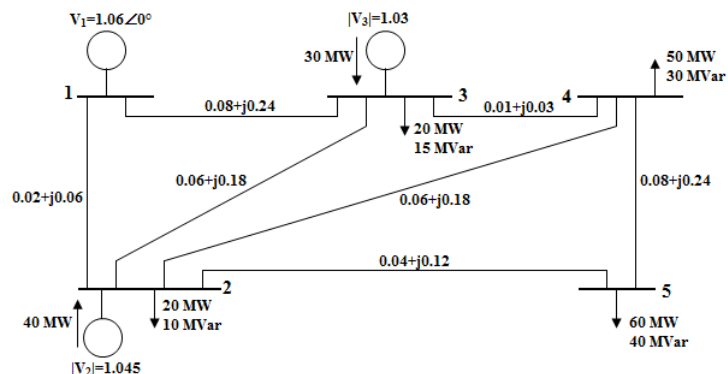


Figura A.1.: Sistema de potencia de 5 barras

¹Matpower es una herramienta computacional para matlab disponible en la web para el análisis de sistemas de potencia, se usó para el sistema de 26 barras dado que powerworld en su versión educativa no resuelve para 26 barras.

ANEXOS A. SOLUCIÓN AL FLUJO DE POTENCIA DE FORMA CENTRALIZADA

Tabla A.1.: Resultados del sistema de 5 barras

Parámetros Barra	Tensión[p.u]		Potencia generada		Potencia demandada	
	Mag	Ang.	Pg[MW]	Qg[MVAR]	Pd[MW]	Qd[MVAR]
1	1.06	0.0	83.05	7.27	-	0.0
2	1.045	-1.78	40.00	41.81	20.00	10.00
3	1.030	-2.67	30.00	24.15	20.00	15.00
4	1.017	-3.12	-	-	50.00	30.00
5	0.988	-4.36	-	-	60.00	40.00
Potencia generada total			153.05	73.23	-	
Carga total				-	150.00	95.00
Potencia de pérdidas (Pp)				3.05 [MW]		

El sistema de 26 barras Se puede observar en la FiguraA.2 la topología del circuito, este fue resuelto por medio de la *toolbox* de *Matpower*, los resultados para ese sistema se muestran en el cuadro.

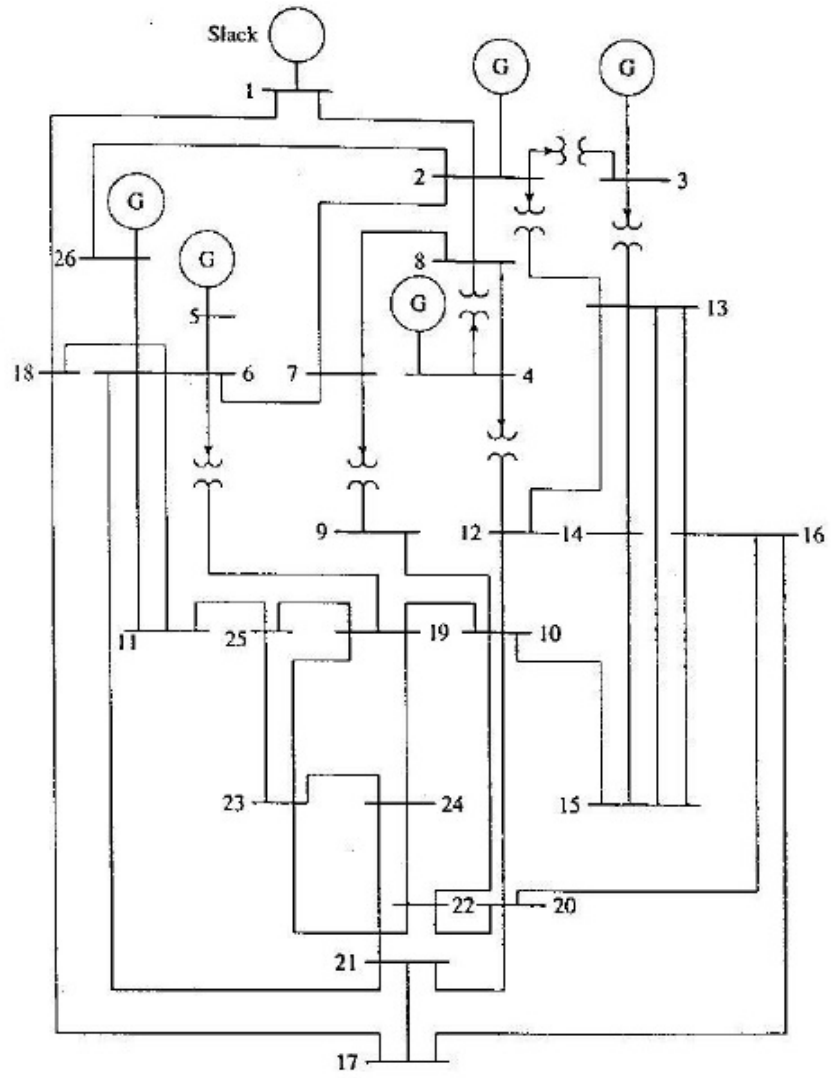


Figura A.2.: Esquema del sistema de potencia de 26 barras

Los resultados para la solución del flujo se muestran en la tabla A.2.

ANEXOS A. SOLUCIÓN AL FLUJO DE POTENCIA DE FORMA CENTRALIZADA

Tabla A.2.: Datos de salida para el flujo centralizado del sistema de potencia de 26 barras

Parámetros Barra	Potencia Generada		Potencia Demandada	
	Pg[MW]	Qg[MVAR]	Pd[MW]	Qd[MVAR]
1	721.41	-355.09	51.00	41.00
2	79.000	700.07	22.00	15.00
3	20.000	24.72	64.00	50.00
4	100.00	74.17	25.00	10.00
5	300.00	151.22	50.00	30.00
6	60.000	38.09	40.00	20.00
7	-	-	-	-
8	-	-	-	-
9	-	-	89.00	50.00
10	-	-	-	-
11	-	-	25.00	15.00
12	-	-	89.00	48.00
13	-	-	31.00	15.00
14	-	-	24.00	12.00
15	-	-	70.00	31.00
16	-	-	55.00	27.00
17	-	-	78.00	38.00
18	-	-	153.00	67.00
19	-	-	75.00	15.00
20	-	-	48.00	27.00
21	-	-	46.00	23.00
22	-	-	45.00	22.00
23	-	-	25.00	12.00
24	-	-	54.00	27.00
25	-	-	28.00	13.00
26	-	-	76.00	29.00
Potencia total	1280.41	633.16	1263.00	637.00
Potencia de Pérdidas		17.411 [MW]		

ANEXOS B

SOLUCIÓN AL DESPACHO DE POTENCIA DE FORMA CENTRALIZADA

La solución al despacho de energía en un sistema de potencia es de vital importancia para atender la demanda , cuando se tienen en cuenta las pérdidas en las líneas de transmisión se resuelve una serie de ecuaciones no lineales que requieren información de todos los nodos presentes en sistema, a continuación se presenta el cuadro de resultados para el sistema de 5 y 26 barras desarrollados en el proyecto con el propósito de tener parámetros de comparación, la solución de estos despachos óptimos fueron realizados con la herramienta computacional *MATLAB* y la toolbox *MATPOWER*¹.

Sistema de 5 barras , en la Tabla B.1 se muestra la distribución de potencia donde el costo marginal del sistema es de $7,759 \frac{\$}{MWh}$. y los costos asociados totales son $1596,96 \$/h$

¹MATPOWER es una herramienta computacional para Matlab gratuita, usada para el análisis de sistemas de potencia.

ANEXOS B. SOLUCIÓN AL DESPACHO DE POTENCIA DE FORMA CENTRALIZADA

Tabla B.1.: Resultados del sistema de 5 barras

Parámetros Barra	Potencia generada		Potencia demandada	
	Pg[MW]	Qg[MVAR]	Pd[MW]	Qd[MVAR]
1	23.649	25.727	-	-
2	69.518	30.767	20.00	10.00
3	59.99	14.052	20.00	15.00
4	-	-	50.00	30.00
5	-	-	60.00	40.00
Potencia generada total	152.154	70.545	-	-
Carga total		-	150.00	95.00
Potencia de pérdidas (Pp)			2.15691 [MW]	

Sistema de 26 barras ,en la Tabla B.2 se muestra la distribución de potencia donde el costo marginal del sistema es de $13,538 \frac{\$}{MWh}$. y los costos asociados totales son $15440,18 \$/h$

Tabla B.2.: Resultados del sistema de potencia de 26 barras

Parámetros Barra	Potencia Generada		Potencia Demandada	
	Pg[MW]	Qg[MVAR]	Pd[MW]	Qd[MVAR]
1	447.18	227.71	51.00	41.00
2	171.60	114.47	22.00	15.00
3	262.12	51.95	64.00	50.00
4	135.63	79.45	25.00	10.00
5	173.86	71.71	50.00	30.00
6	84.91	44.89	40.00	20.00
7	-	-	-	-
8	-	-	-	-
9	-	-	89.00	50.00
10	-	-	-	-
11	-	-	25.00	15.00
12	-	-	89.00	48.00
13	-	-	31.00	15.00
14	-	-	24.00	12.00
15	-	-	70.00	31.00
16	-	-	55.00	27.00
17	-	-	78.00	38.00
18	-	-	153.00	67.00
19	-	-	75.00	15.00
20	-	-	48.00	27.00
21	-	-	46.00	23.00
22	-	-	45.00	22.00
23	-	-	25.00	12.00
24	-	-	54.00	27.00
25	-	-	28.00	13.00
26	-	-	76.00	29.00
Potencia total	1275.31	590.17	1263.00	637.00
Potencia de Pérdidas		12.31 [MW]		

ANEXOS C

CONCEPTOS BÁSICOS EN JASON

El lenguaje interpretado por JASON es una extensión de *AgentSpeak*, que se basa en la arquitectura BDI. Por lo tanto, uno de los componentes de la arquitectura de agente es una base de creencias, donde el agente puede percibir el medio ambiente y actualizar la base de creencias en consecuencia.

Otro componente importante es que las metas del agente, se logran mediante la ejecución de planes. Los planes son cursos de acción que los agentes ejecutan con el fin de manejar eventos. Las acciones, a su vez cambian el agente de medio ambiente, de tal manera que podemos esperar metas del agente que deben alcanzarse. Debe tenerse en cuenta que los agentes asociados a este proyecto son netamente reactivos, es decir, solo responden a estímulos o señales generadas por otro agente o percibidas del entorno, estos sistemas están diseñados para estar funcionando permanentemente, reaccionando a algún tipo de "evento".

Creencias "*Beliefs*" Los 3 tipos de creencias que pueden adquirir los agentes son las siguientes:

1. *Información perceptiva*: Agente que adquiere creencias como consecuencia de la visualización de su entorno (*environment*). Es una representación simbólica de una propiedad del medio ambiente. De acuerdo a la percepción que tenga en su ambiente puede tomar ciertas creencias.
2. *Comunicación*: Ocurre cuando los agentes se comunican con otros agentes en una plataforma multi agente (MAS). Los mensajes entre los agentes son útiles en la medida que se activan creencias y se ejecutan acciones en base a estas.
3. *Notas mentales*: Realiza ciertas tareas de programación más fácil si los agentes son

capaces de recordarse a sí mismos de las cosas que sucedieron en el pasado, o cosas que el agente ha hecho o prometido. Las creencias de este tipo se añaden a la base de creencias por el agente como parte de un plan de ejecución. La mejor manera de pensar en este tipo de creencia es la siguiente, el propio agente tendrá que recordar en cierto futuro circunstancias ocurridas.

Reglas "Rules" Las reglas de base en la creencia de un agente pueden simplificar ciertas tareas, por ejemplo, en la fabricación de ciertas condiciones utilizadas en los planes. En resumen las reglas en un plan o creencia son usadas como condiciones para determinar si el plan o creencia pueden ser ejecutados o no, normalmente la base de reglas son generadas por las creencias de tipo nota mental.

Esquemas de uso frecuente A continuación, se describen los esquemas que más se usaron en el desarrollo de los agentes, donde se explica en que consiste cada una. La metodología usada para este propósito es seleccionar ciertas líneas de código para ser explicadas.

- Estas líneas muestran una nota mental o condición llamada "listo" la cual tiene asociadas unas condiciones para poder ser ejecutada como verdadera. La segunda y tercera línea se observa la condición para "listo" donde *.findall* tiene como función encontrar todas las creencias llamadas *"tension(X,Y)"*, capturar solo la variable *X* y posteriormente almacenar los valores de *X* en una tupla de nombre *Z*, quedando de la siguiente manera: $Z = [X_1, X_2, \dots, X_n]$. En cuanto a *.length* es el encargado de capturar el tamaño de *Z* y almacenar ese número en la variable *N*.

listo

```
:- .findall(X,tension(X,Y),Z) & .length(Z,N) & vecinos(P) &
    .length(P,M) & N == M .
```

- Las líneas que se presentan a continuación inician con un *trigger* o lanzador de plan llamado *"!pregunta"*, cuando en un agente se encuentra el signo de admiración (!) quiere decir que el plan se va a ejecutar. Una vez ejecutado el plan tiene una condición en la siguiente línea para este caso *true* (La línea de condicionalidad se identifica porque al inicio tiene dos puntos). *True* indica que no existe ninguna condicionalidad. La línea *"?vecinos(X)"* pregunta por la creencia vecinos. Seguidamente, *".send(X,achieve,ansV)"*, hace referencia a decirle a *X* (tupla o un solo termino) que logre el plan "ansV", en este caso *achieve* funciona como lanzador del plan en otro agente.

ANEXOS C. CONCEPTOS BÁSICOS EN JASON

```
/* Initial goals */
!pregunta.
/* Plans */
@preguntaTensiones
+!pregunta
: true
<- ?vecinos(X);
    .send(X,achieve,ansV).
```

- En las siguientes líneas de código aparecen nuevos conceptos como "*gausseidel(Mag,Ang,T)*", donde esta línea inicia sin punto, lo cual indica que la función *gausseidel* se ejecuta en el entorno (*environment*) para el agente donde se encuentre dicha función. Y el término "*.abolish(tension(_,_));*", remueve o suprime la creencia asignada a la palabra *tension* y sus respectivas variables.

```
@excedenteCorriente
+!corriente
: true
<- .findall([X,Y],tension(X,Y),T);
    ?vmagnitude(Mag);
    ?vangle(Ang);
    gausseidel(Mag,Ang,T);
    .abolish(tension(_,_));
    !!actualiza.
```

- Se debe tener en cuenta que el programa JASON cuenta con aplicaciones propias de *Java*¹, las cuales permiten ejecutar ciertas funciones dentro de la programación del agente, también, cabe resaltar que los agentes no están capacitados para realizar operaciones complejas en su programación, por tal motivo acuden al entorno donde se programa en *Java*. Las líneas mostradas a continuación describen una lista de funciones que pueden ser de utilidad en la creación del agente cuando es removido. En este caso "*.kill_agent*" hace referencia a "eliminar el agente". Cuando se elimina el agente queda una lista vacía, el agente pierde todas sus creencias e inexistente. Sin embargo, puede ser creado nuevamente con el comando "*.create_agent*" donde de nuevo se establecen sus creencias. El comando ".print" permite visualizar lo que se desee. En el caso de este código ".print" es utilizado para ver en el comando cuando haya finalizado el flujo de

¹Disponible en <http://jason.sourceforge.net/api/>

```

potencia.

.kill_agent(c);
.print(" Power Flow OK ");
.create_agent(c,"c.asl");

```

C.1 Código de Agentes

A continuación se presentan los agentes utilizados para el desarrollo del proyecto, en los agentes se observa las metas iniciales, creencias iniciales, reglas y mensajes de un agente a otro, además, el momento en que el agente recoge percepciones del ambiente.

El agente nodo Se caracteriza por ser el único en tener metas iniciales, quiere decir que una vez ejecutado el programa este es el primero en cumplir sus planes, mientras los otros agentes esperan una señal.

El agente g “Gerente” Es el encargado de establecer las tolerancias de parada para el flujo de carga y el despacho.

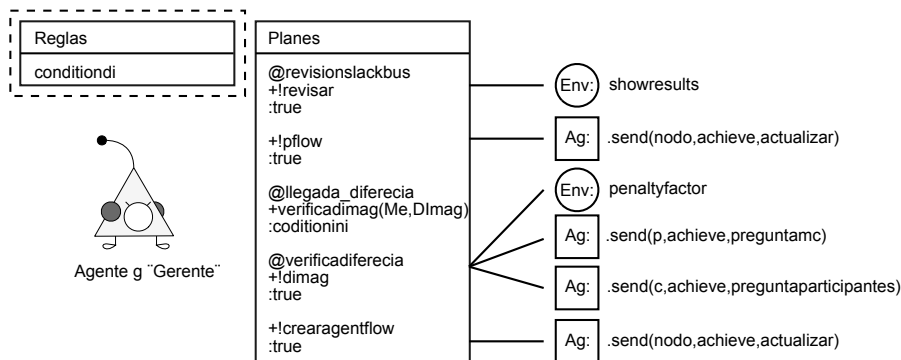


Figure C.1.: Comportamiento agente gerente

El agente c “Controlador” Es encargado de organizar el protocolo de comunicacion entre los agentes participantes del mercado.

ANEXOS C. CONCEPTOS BÁSICOS EN JASON

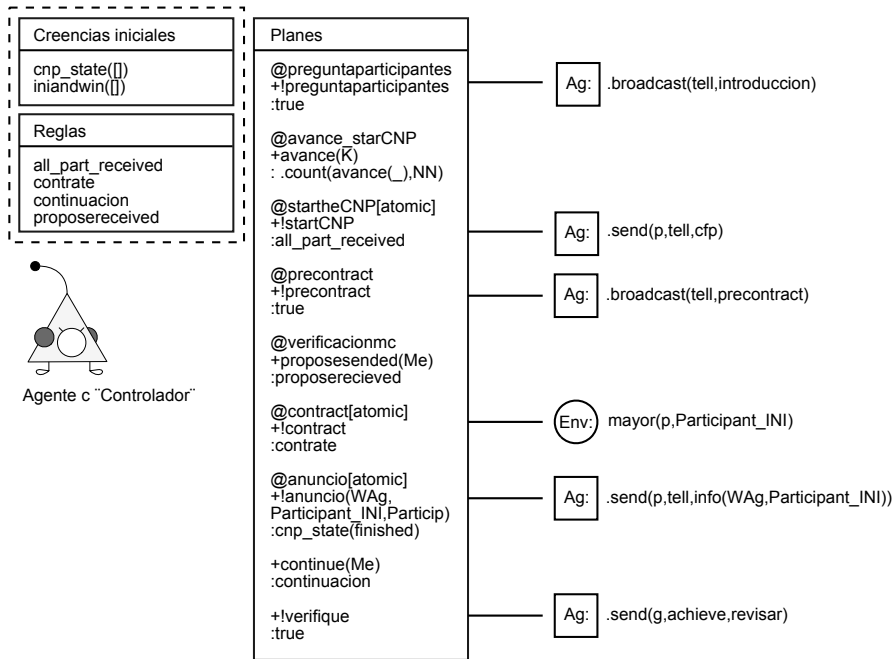


Figure C.2.: Comportamiento agente controlador

El agente p "Participante" Representa el comportamiento de cada participante presente en el mercado, es decir, la barra slack y barras PV.

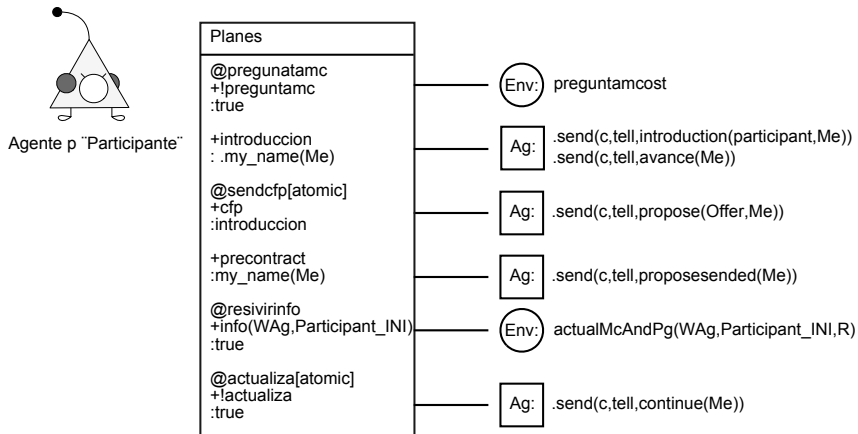


Figure C.3.: Comportamiento agente p