



Universidad
Zaragoza



Departamento de
Ingeniería Eléctrica

Universidad Zaragoza

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Industrial

Control distribuido de micro-redes eléctricas

Autor

Carlos Alonso Bes

Director

José Antonio Domínguez Navarro

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

Febrero 2012

Resumen

La generación distribuida parece ser el futuro al que se encaminan nuestras redes eléctricas actuales. La gestión de dicha generación se quiere conseguir con el desarrollo del concepto de micro-red, que mediante una operación flexible permitiría la integración de las energías renovables.

Debido a sus características, se necesitan nuevos sistemas de gestión distribuidos y escalables.

El objetivo de este proyecto ha sido la creación de un sistema de gestión distribuido de micro-redes eléctricas que permita controlar los flujos de potencia y las tensiones en dichas redes.

La plataforma multi-agente utilizada ha sido JADE y el simulador PSAT. Se ha usado JADE por ser una librería creada en Java y, por tanto, ser fácilmente portable a cualquier hardware con el intérprete adecuado. El simulador PSAT se ha elegido por ser de libre distribución. La comunicación entre el simulador y el sistema de control se hará a través de una versión ampliamente modificada de GridIQ, también de libre distribución.

Finalmente se ha evaluado el sistema de gestión desarrollado en varias redes de prueba y se han analizado los resultados obtenidos.

Agradecimientos

A continuación os presento el texto con el que finalizo un periodo de mi vida. Sería injusto que no mencionara a las personas que me han acompañado todos estos años y, sin duda, han hecho todo esto posible.

A José Antonio, sin tu tiempo y supervisión jamás habría terminado este proyecto.

A mis amigos de la universidad, con vuestra compañía y apoyo durante la carrera los tiempos duros apenas lo parecían.

To my erasmus *family*, you all taught me more than nobody.

Mis amigos de toda la vida. Por estar siempre.

A mis compañeros de gimnasio. Habéis sido mi vía de escape

A Irene, por amenizar todas mis mañanas.

A mi hermano, por ser un modelo a seguir.

A todos los que no he mencionado y no por ello menos importantes.

A mi madre,
que me lo ha dado todo.

Tabla de Contenidos

PARTE I

Capítulo 1 - Introducción.....	1
1.1. Contexto	1
1.2 Objetivo y alcance del proyecto.....	2
1.3 Ámbito y motivación	2
1.4 Organización del documento	3
Capítulo 2 - Conceptos y pasos previos	5
2.1 Revisión bibliográfica	5
2.2 Micro-red.....	8
2.3. Sistemas multi-agente.....	8
2.3.1. Qué es un agente	8
2.3.2 Agente como entidad autónoma [12].....	9
2.3.3 Agente como poseedor de inteligencia [12].....	9
2.3.4 Los agentes tienen movilidad [12]	10
2.3.5 Los agentes como sistema multi-agente [9], [12]	10
2.3.6 Comunicación entre agentes [9]	10

PARTE II

Capítulo 3 - Modelado de la micro-red con sistemas multi-agente	15
3.1 Descripción del SMA.....	15
3.1.1 Características del SMA.....	15
3.2 Localización física y funciones básicas de cada agente del sistema.....	16
3.2.1 Agentes abstractos.....	17
3.2.2 Agentes reales	18
Capítulo 4 - Algoritmo del cálculo del mínimo coste.....	23
4.1 Estructura del algoritmo.....	23
4.2 Ejemplos y resultados	26
4.2.1 Caso 1	26

4.2.2 Caso 2	30
Capítulo 5 - Algoritmo del cálculo del flujo eléctrico	37
5.1 Estructura del algoritmo.....	37
5.2 Ejemplos y resultados	39
Capítulo 6 - Algoritmo del control secundario de voltaje.....	43
6.1 Estructura del algoritmo.....	43
6.2 Ejemplos y resultados	47
Capítulo 7 - Conclusiones y Líneas futuras.....	49
7.1 Conclusiones.....	49
7.2 Líneas futuras	50
Capítulo 8 - Bibliografía	53

PARTE I:
Introducción de la memoria

A continuación se presenta la memoria del Proyecto Fin de Carrea (PFC) “Control distribuido de micro-redes eléctricas”. El objetivo final de este proyecto, ha sido realizar parte de un control distribuido para gestionar micro-redes.

Se va a exponer en esta memoria el trabajo realizado, los resultados obtenidos mediante simulación y las conclusiones finales.

1.1. Contexto

La mayor parte de la energía que consumimos hoy en día es de carácter no renovable y además contamina el medio ambiente. Debido al progreso y al aumento de la población, la necesidad de energía eléctrica se incrementa de manera inevitable. Es por tanto fácil de observar que necesitamos unas fuentes de energía nuevas que sean inagotables y que además dañen lo menos posible el medio ambiente. El uso de energías renovables viene acompañado de nuevos problemas como la variabilidad de la generación eléctrica. Lo cual, hace más complejo el equilibrio entre generación y consumo, además de complicar la estabilidad y la controlabilidad del sistema eléctrico.

Para solucionar estos nuevos retos aparece el concepto de micro-red. Esta palabra aún no posee una definición universalmente aceptada, como se puede leer en [1] y [2]. El concepto de micro-red que usamos en este proyecto lo hemos cogido prestado de los artículos [2], [3] y [4] de la bibliografía. A modo de resumen, una micro-red es una red que tiene generación distribuida y trabaja a bajos voltajes, pudiendo operar aisladamente del resto de la red.

Tradicionalmente, la generación de energía eléctrica se producía en contados puntos de la red que, por lo general, están alejados de los consumidores. En las micro-redes ocurre distinto. Al usar energías renovables, se usa un sistema de *generación distribuida*, pudiéndose acercar los puntos de producción a los de consumo.

Como se ha mencionado antes, el uso de energías renovables conlleva el problema de la variabilidad en la generación. Para solventar este reto, parece ser inevitable el uso de *sistemas de almacenamiento eléctrico* (SAE) que guarden la energía sobrante para entregarla cuando haya un pico de consumo. El SAE se presupone distribuido, igual que la generación.

Ante este nuevo escenario hace falta un sistema de gestión que se adapte a las nuevas características de la red. Este sistema de gestión, se pretende que sea

distribuido, inteligente y autónomo. Se propone aplicar los sistemas multi-agente (SMA) como solución al problema. Los SMA se utilizan en la creación de inteligencia distribuida, por lo que a priori aportan un marco adecuado para la creación del sistema de gestión. De hecho, en los artículos [3] – [8] se propone SMA para el control y gestión de micro-redes con resultados satisfactorios.

1.2 Objetivo y alcance del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es la presentación de un SMA que sea capaz de gestionar una micro-red. Se ha diseñado el sistema para que sea distribuido, autónomo y escalable. Esta última propiedad aporta gran flexibilidad al SMA, muy útil para posibles cambios o ampliaciones en la micro-red.

Para estudiar la efectividad del SMA se han realizado simulaciones y se han estudiado los resultados. Todos estos datos, junto a la explicación de los algoritmos, se presentan en la parte II de la memoria. En algunas simulaciones ha sido necesaria la utilización del software Psat, de libre distribución, para la obtención del flujo de potencia. La comunicación entre el Psat y el SMA se ha realizado con una amplia modificación del middleware GridIQ, también de libre distribución.

El trabajo presentado en el siguiente PFC es parte de un SMA que se pretende desarrollar dentro de un proyecto de investigación. En concreto, en este proyecto presentamos los siguientes módulos:

- Algoritmo de cálculo del mínimo coste
- Algoritmo de cálculo del flujo eléctrico
- Algoritmo de control secundario de voltaje

1.3 Ámbito y motivación

Este PFC se enmarca dentro de un proyecto más grande, que consiste en la creación de un SMA completo capaz de controlar una micro-red con generación de energías renovables y almacenamiento. Este proyecto se ubica en el Departamento de Energía Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.

La motivación personal que me llevo a escoger este trabajo fue la integración de energías renovables, control y programación en el mismo proyecto. Temas que siempre me han interesado en ingeniería. Además, el aprendizaje de SMA que conlleva este proyecto me llamó la atención desde el primer momento. También, la posibilidad de ampliar este trabajo después de acabar el PFC fue uno de los motivos principales por lo que lo escogí.

1.4 Organización del documento

El documento consta de la memoria y los anexos. En la memoria se describe lo esencial para comprender el trabajo realizado y en los anexos se amplía la información suministrada para que se consulte si es preciso.

La memoria consta de dos partes, en la primera se hace una introducción al proyecto y en la segunda se explican los algoritmos creados, las simulaciones realizadas y el análisis de resultados. En el capítulo 1, se encuentra la introducción al PFC situando el contexto, ámbito y objetivos del proyecto. En el capítulo 2 se encuentra información necesaria para la comprensión del proyecto y la revisión bibliográfica. En el capítulo tres se habla de cómo se ha modelado la micro-red y de las propiedades del sistema de control. En los capítulos 4, 5 y 6 se explican los algoritmos presentados y se exponen los resultados para su validación. Para acabar, se exponen las conclusiones y las líneas futuras en el capítulo 7 y la bibliografía usada en el capítulo 8.

Conceptos y pasos previos

En este capítulo se explican los conceptos que son necesarios para entender el contenido de la memoria. También, se muestra la revisión bibliográfica que se hizo al principio del proyecto.

2.1 Revisión bibliográfica

En la primera etapa del proyecto se ha reunido bibliografía sobre micro-redes y SMA ya desarrollados para estudiar su viabilidad y eficiencia. Al final del apartado, se muestra la Tabla 2.1 señalando que aspectos comenta cada documento de la bibliografía.

En [1] se habla sobre el futuro de las redes eléctricas. Supone que las energías renovables serán las más usadas en el futuro y habla sobre la necesidad de utilizar micro-redes. Remarca que el concepto de micro-redes es muy joven y no está muy bien definido. Sin embargo, en lo que parece estar de acuerdo todo el mundo es que usarán energías renovables distribuidas y necesitará el uso de tecnologías de la información para su control. Propone internet como la solución al problema de comunicación que debería de haber entre consumidores y proveedores. Como esta información puede ser de gran valor, debe ser correctamente protegida y encriptada. Afirma que todavía falta una gran infraestructura y tecnología para conseguir crear una micro-red, como casas inteligentes que ahorren energía o contadores de luz inteligentes.

El artículo [2] es parecido al anterior. Empieza comentando que la palabra micro-red significa cosas distintas para personas distintas. Sin embargo, lo que está seguro es que se servirá de la tecnología de la información y de sistemas de comunicación para su funcionamiento. El reto a conseguir es construir una red que se ajuste a nuestra demanda y que a la vez sea socialmente aceptada. El uso de energía renovable en la micro-red, exige el uso de almacenamiento para abastecer los picos de demanda. Otro aspecto que comenta, es que hoy en día estamos acostumbrados a usar la energía cuando queramos. Esto puede cambiar en un futuro mediante casas inteligentes, que no gasten más energía de la necesaria y que la consuman cuando haya un exceso de generación. Para coordinar el consumo, la generación y el almacenamiento hará falta un sistema de control inteligente.

En la mayoría de los artículos sobre SMA ha sido difícil encontrar alguno donde hablen del algoritmo de control usado. A continuación se va a hablar sobre los artículos sobre SMA usados para la revisión bibliográfica.

En el artículo [3] empiezan justificando por qué las micro-redes necesitan sistemas de control distribuidos. Después, hacen una descripción cualitativa de los agentes usados y sus ontologías, pero no profundiza en los algoritmos de control. Al final, explica como se hizo la simulación en una red de pruebas y las conclusiones.

El artículo [4] es más completo que el anterior. Define más extensamente la lógica del programa punto por punto. Explica también el modelo matemático que hay detrás de este algoritmo y cómo se realizó la simulación.

En [5] se propone un esquema de control para la restauración de cargas tras un fallo en la red. Primero habla sobre las técnicas que son actualmente usadas, como las heurísticas o las de *soft computing*. Después, pasa a explicar el modelo matemático que hay detrás de este problema y explica el funcionamiento del algoritmo mediante un ejemplo. Para acabar, el artículo describe como se han hecho las simulaciones y compara los resultados con otros sistemas de restauración de carga para estudiar su eficacia.

Los artículos [6] y [7] hablan sobre el sistema AuRA-NMS, desarrollado en Reino Unido. Este sistema de control tiene como objetivo asumir el control de restauración automática, control de voltaje, gestión del flujo de potencia y tareas de optimización como reducción de pérdidas en la red. Habla sobre cómo está hecho AuRA-NMS y lo que es capaz de hacer, pero no aporta información de los algoritmos y la lógica que usan. Esto mismo pasa con otros artículos que no han sido incluidos en la bibliografía.

Las conclusiones de los artículos anteriores coinciden en la efectividad de los SMA a la hora de crear un sistema de control distribuido. Sin embargo, solo se ha conseguido obtener una explicación breve de la lógica utilizada en algún algoritmo. Tampoco hemos obtenido una explicación clara de cómo se han hecho las simulaciones. Problemas que se tendrán que solucionar para este PFC. Tan solo se ha encontrado una excepción, en el capítulo 10 del libro [8] se encuentra perfectamente explicada la lógica de un algoritmo de control secundario de voltaje. En este PFC, se ha usado ese capítulo como punto de partida para diseñar el algoritmo expuesto en el capítulo 6 de la memoria.

El libro [9] ha sido ampliamente consultado en este proyecto. Gracias a él, se han aprendido las nociones básicas sobre JADE. Este libro, además de enseñar las opciones que tiene JADE, introduce de manera extensa qué es y para qué sirven los SMA.

Los libros [10]-[11] han tenido como única función en este PFC aportar conocimientos básicos sobre control y estabilidad en las redes eléctricas.

Autor y nombre del documento	Año	Sistemas multi-agente				Programación		Micro-redes	
		Expone el modelo matemático	Expone la lógica del algoritmo	Explica cómo se hizo la	Expone resultados	Java	Jade	Concepto de micro-red	Estabilidad y control de micro-redes
Matthias Wissner. "The smart grid – A saucerful of secrets?"	2011							X	
Peter Crossley, Agnes Bevizof. "Smart energy systems: Transitioning renewables onto the grid"	2010							X	
A. Dimeas, N. Hatzigargyriou. "A Multi-Agent System for Microgrids"	2004		X	x	x			X	
A. Dimeas, N. Hatzigargyriou. "Operation of a Multiagent Systemfor Microgrid Control"	2005	X	X	X	X				
T. Nagata, H. Sasaki. "A Multi-Agent Approach to Power System Restoration"	2002	x	x		x				
Philip Taylor, Stephen McArthur, Graham Ault et al. "INTEGRATING VOLTAGECONTROL AND POWER FLOW MANAGEMENT IN AURA-NMS"	2008		x						
Euan M. Davidson, Stephen D. J. McArthur, Michael. J. Dolan, et al. "Exploiting Intelligent Systems Techniques within an Autonomous Regional Active Network Management System"	2008		x						
Christian Rehtanz. <u>Autonomous System and Intelligent Agents in Power System Control and Operation</u>	2003								X
Fabio Bellifemine, Giovanni Caire y Dominic Greenwood. <u>Developing multi-agent systems with JADE</u>	2004						X		
Prahba Kundur. <u>Power system stability and control</u>	1994								X
Ryszard Strzelecki, Gzregorz Benysek. <u>Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks</u>	2008							X	X

Tabla 2.1 Tabla resumen de la bibliografía usada durante el proyecto

2.2 Micro-red

En los artículos [1] y [2] se comenta que la definición de micro-red no es única. En este PFC vamos a escoger la definición de micro-red que aparece en los artículos [3] y [4].

En el artículo [3] la definición de micro-red es “un nuevo tipo de sistema eléctrico el cual está formado por la interconexión de pequeños módulos de generación de bajo voltaje. Las micro-redes pueden estar conectadas a la red principal o pueden operar de forma autónoma, de forma similar a sistemas eléctricos de islas físicas.”

En [4] se comenta que una micro-red puede tener sistemas de almacenamiento eléctrico.

Sintetizando los dos párrafos anteriores extraemos que una micro-red tiene generación distribuida, trabaja a bajos voltajes, puede trabajar en modo aislado de la red y puede tener sistemas de almacenamiento.

Las ventajas de las micro-redes son la integración de energías renovables, que son de carácter distribuido, y que los puntos de generación y de consumo están próximos entre si, consiguiéndose así reducir las pérdidas en el transporte y distribución de energía eléctrica.

La principal desventaja de una micro-red es que su control es más complejo. Esto se debe a que la tipología de la micro-red ya no tiene que ser radial. Debido a la nueva tipología, se hace más fácil la propagación de una falta, pudiéndose producir la *caída* en cascada de la micro-red [4]. Además, el flujo de energía ya no es unidireccional, por lo que es más complejo de controlar y se necesitan sistemas de protección más sofisticados. A todo esto, debemos incluir la aleatoriedad de las energías renovables, que hace más complejo el equilibrio entre generación y consumo.

2.3. Sistemas multi-agente

Los agentes tienen su origen en el campo de la inteligencia artificial. Cuando se empezó a desarrollar la inteligencia artificial distribuida surgió el concepto de SMA. La investigación en este campo progresó y maduró hasta obtener la programación orientada a agentes y la ingeniería del software orientada a agentes [12].

2.3.1. Qué es un agente

Como con el concepto de micro-red, no hay una única definición de lo que es un agente. No obstante, todas las definiciones de agente están de

acuerdo en que es un componente de software que tiene autonomía. Además, tiene la capacidad de compartir información con otros agentes y usarla para alcanzar sus objetivos. Y puede comportarse como un agente humano [9].

Extendiendo un poco más la definición anterior diremos que un agente tiene cuatro aspectos fundamentales: que es una entidad autónoma, que es inteligente, que tiene “movilidad”, que trabajan de forma conjunta como SMA y que posee habilidades sociales.

2.3.2 Agente como entidad autónoma [12]

Autonomía, reactividad e iniciativa son las tres propiedades que caracterizan al agente como entidad autónoma.

Autonomía quiere decir que los agentes pueden trabajar sin la intervención directa del usuario y tienen cierto control sobre sus acciones y estado interno.

Reactividad significa que son capaces de responder a los estímulos de su entorno mediante acciones. El entorno puede ser cualquier entidad de la que pueda obtener estímulos, como sensores que miden magnitudes físicas, una interfaz usuario-agente, otros agentes, etc.

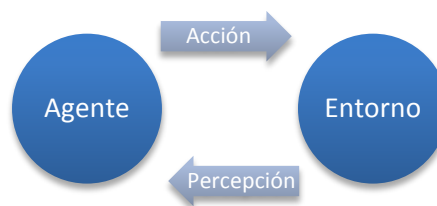


Figura 2.1 Esquema de la propiedad reactiva de un agente

Iniciativa quiere decir que un agente puede realizar acciones para perseguir sus objetivos incluso cuando no reciba estímulos del entorno.

2.3.3 Agente como poseedor de inteligencia [12]

Un agente tiene la capacidad de razonar y aprender.

Razona, porque es capaz de decidir que objetivo perseguir o a que estímulo reaccionar. Decide como actuar para lograr sus metas y también puede parar o suspender una tarea para dedicarse a otra.

Un agente puede adaptarse mediante técnicas de aprendizaje al entorno y a las variaciones dinámicas de éste. De sus experiencias, puede aprender para tomar mejores decisiones en un futuro.

2.3.4 Los agentes tienen movilidad [12]

Lo que quiere decir este tercer aspecto es que un agente puede viajar de un nodo a otro conservando su estado interno entre viajes. Este aspecto le permite al agente conseguir estímulos locales en cada nodo de la red para tener un conocimiento global del sistema.

2.3.5 Los agentes como sistema multi-agente [9], [12]

Normalmente, un agente no se encuentra solo sino que están organizados en un sistema con varios agentes formando un SMA. Éste, puede modelar sistemas complejos e introducir la posibilidad de que los agentes tengan objetivos comunes o en conflicto. Por ejemplo, imaginemos un radiador en el que hay dos agentes. Uno intenta llegar a la temperatura deseada lo más rápido posible y el otro intenta controlar el uso de la resistencia para que el radiador dure más tiempo. Los dos agentes tienen objetivos conflictivos por lo que tendrán que negociar una solución intermedia para satisfacer los objetivos de ambos. Un ejemplo de cooperación podría visualizarse con el caso típico de dos tanques de agua que quieren mantener el nivel de agua de una piscina. Cada tanque estaría controlado por un agente y estos tendrían el mismo objetivo, el de mantener el nivel de una piscina en un punto determinado. Se comunicarían entre ellos para decidir cuanto caudal vierte cada uno en la piscina y así mantener fijo el nivel de agua en la piscina.

2.3.6 Comunicación entre agentes [9]

La comunicación entre agentes les permite compartir información del mundo exterior y coordinarse para realizar tareas de forma global. La *Foundation for Intelligent Physical Agent*¹ (FIPA) es una organización encargada de realizar estándares sobre la tecnología basada en agentes para asegurar interoperabilidad (es decir, ser capaz de compartir información) entre distintas SMAs y otras tecnologías.

FIPA ha fijado también estándares para la comunicación entre agentes que se conocen como FIPA – ACL. Está basado, en la teoría de discursos cuyos mensajes representan distintas acciones de habla o actos comunicativos. FIPA – ACL recoge veintidós actos comunicativos, de los cuales se muestran unos cuantos en la siguiente tabla.

¹ Para más información sobre FIPA visitar su páginas web oficial <<http://www.fipa.org/>>

Acto comunicativo	Explicación
cfp (call for proposal)	solicitar propuestas para realizar una acción dada
accept-proposal	aceptar una propuesta recibida previamente
Agree	estar de acuerdo en realizar alguna acción
Cancel	cancelar alguna acción pedida previamente
Inform	Informar a un receptor que una proposición es cierta
Request	solicitar a un receptor que realice alguna acción

Tabla 2.2 Ejemplos de actos comunicativos que recogen los estándares FIPA-ACL

Continuando con el ejemplo de los dos tanques que llenan una piscina, un mensaje con el acto comunicativo INFORM podría ser:

Acto comunicativo INFORM	
Emisor	Tanque1
Receptor	Tanque2
Contenido del mensaje	Vertiendo 2 l/s de caudal a la piscina

Tabla 2.3 Ejemplo de mensaje entre dos agentes

FIPA también ha definido protocolos de comunicación que no son más que patrones de comunicación. Quizá el protocolo más famoso es el FIPA-Contract-Net cuya estructura se puede ver en la Figura 2.2.

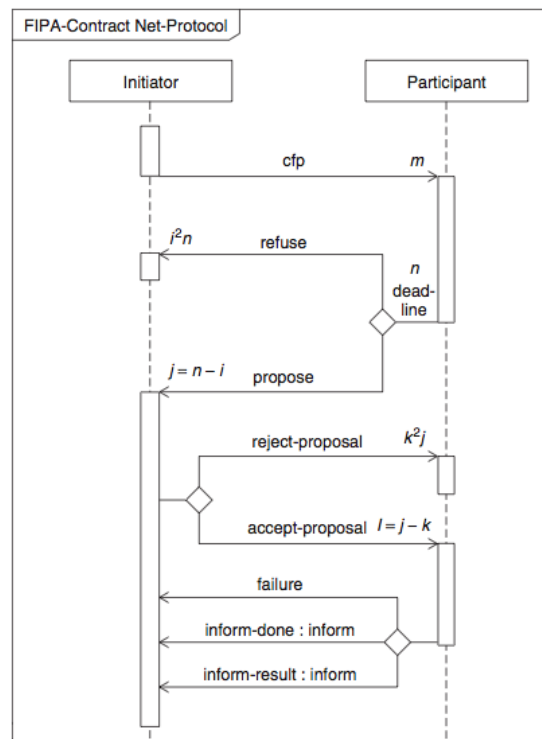


Figura 2.2 El protocolo Contrac Net Protocol de FIPA

En este protocolo hay un agente iniciador y varios agentes participantes. El iniciador envía un primer mensaje a los participantes pidiéndoles algo. Los participantes le devuelven el mensaje con una propuesta o un fallo si deciden no participar. El agente iniciador recoge todas las propuestas y escoge entre ellas las que más le interesan. A los participantes cuya propuesta es aceptada se les envía un mensaje de propuesta aceptada y a los demás uno de propuesta no aceptada. Los participantes cuya propuesta ha sido aceptada, envían un último mensaje para comunicar si la acción ha sido realizada o si ha habido algún error al intentar ejecutarla.

PARTE II:

**Presentación de los algoritmos
de control**

Capítulo 3

Modelado de la micro-red con sistemas multi-agente

En este capítulo se va a hablar sobre como se ha modelado el SMA.

En los dos apartados del capítulo se comenta en profundidad las características del sistema de gestión desarrollado, la localización física de cada agente y sus funciones básicas dentro del sistema. Al final del capítulo se ofrece una tabla en la que se resumen todas las características de los agentes.

3.1 Descripción del SMA

3.1.1 Características del SMA

Durante todo el documento, hemos comentado las características que se han querido imprimir al sistema de gestión, en este apartado se explica claramente el porqué de cada una de ellas y cómo se ha implantado.

Las características principales del SMA son: *escalabilidad*, *autonomía* y *distribuido*. A estas tres, se le ha añadido la característica de que no haya una figura de árbitro en un ámbito superior al de la micro-red. En otras palabras, no hay un agente que haga de coordinador o árbitro entre agentes de distintas micro-redes. Con esto, se ha pretendido conseguir que la micro-red se constituya como *célula unidad*, es decir, como elemento independiente del resto.

- **Escalabilidad**

Cada agente que se ha creado no conoce que hay más allá de su *entorno más próximo* y es capaz de adaptarse a él de forma *dinámica*. Por entorno más próximo nos referimos a aquél cuyos estímulos pueden afectar notablemente en las decisiones del agente. Además, el agente es capaz de detectar cambios en el entorno y adaptarse a ellos instantáneamente sin necesidad de reiniciarlo o reconfigurarlo.

Esta propiedad, aporta mucha flexibilidad al agente. Ya que, si se hacen ampliaciones o cambios físicos en la micro-red no hay que estar reajustando continuamente el sistema de control, sino que es el sistema de control el que se adapta a la micro-red.

- **Autonomía**

Unos de los objetivos de este sistema de gestión es que sea lo más autónomo posible. Cada agente, recibe estímulos de su entorno y responde a ellos mediante acciones para la consecución de sus objetivos. Para llegar a estos objetivos, el agente se pone en contacto con los otros agentes de su entorno. Si comparten el mismo objetivo, van a cooperar entre ellos para conseguirlo. Sin embargo, si los objetivos son contrarios van a negociar entre ellos para llegar a un acuerdo que satisfaga a todos los agentes.

- **Distribuido**

Tradicionalmente, los sistemas de control han recogido los datos de toda la red² y los han recopilado en un ordenador central para procesarlos. Desde este mismo ordenador, se llevan señales de control a los controladores distribuidos en la red.

El SMA propuesto funciona de forma distinta. Cada agente recopila datos locales (estímulos) y los procesa él mismo, decidiendo que acción realizar en función de esos datos.

- **Micro-red como célula unidad**

Parece ser, que la figura de arbitro es imposible evitar ya que, por ejemplo, en situaciones anormales de funcionamiento es necesario tomar medidas centralizadas para que la red no colapse. Los algoritmos creados para este PFC, se han diseñado con la idea de que va a haber un árbitro para cada micro-red con el poder de tomar decisiones que afecten como mucho a la propia micro-red. De esta manera, se pretende conseguir que la micro-red sea un elemento independiente del resto de la red.

Sin embargo, para algunas tareas es necesario que varias micro-redes cooperen entre ellas y compartan información. Para solucionar este reto, se ha dotado a los árbitros de cada micro-red con la capacidad de detectar otros árbitros dentro de su *entorno próximo*.

3.2 Localización física y funciones básicas de cada agente del sistema

Hay dos tipos de agentes dentro del sistema de gestión. Los que están asociados a un dispositivo físico y pueden manejarlo, denominados *reales*, y los que

² El software SCADA es el más conocido a la hora de recogida de datos

no, denominados *abstractos*. Primero, se va a hablar de los *agentes abstractos* y luego de los *agentes reales*. Se va a comentar de cada uno de ellos tanto sus habilidades o capacidades, como su entorno y los objetivos que persiguen. El número de habilidades o capacidades que puede tener un agente es bastante grande, por lo que en los siguientes apartados se mencionan tan solo las más importantes.

3.2.1 Agentes abstractos

- **Agente de mínimo coste**

Hay un único agente de este tipo por micro-red. La principal capacidad de este agente es el cálculo del mínimo coste eléctrico. Para ello recoge los siguientes datos: demanda a satisfacer, cantidad de energía generada y su precio de venta. Una vez recopilados los datos, los ordena por precio y copa la demanda con la energía más barata. Una vez acabado, se pone en contacto con las micro-redes de su entorno para ofrecer su energía sobrante en una subasta pública. A la vez que realiza la subasta, busca en otras subastas de su entorno alguna fuente de energía que pueda minimizar aún más el precio de la energía.

Otra habilidad de este agente es la detección de la existencia de un consumo superior al que se puede satisfacer. Si es así, este agente envía una petición a los agentes instalados en los puntos de demanda para cortar ese exceso.

El entorno en el que trabaja este agente se limita mediante un radio de acción o distancia física. Solo interacciona con otras micro-redes que estén *cerca* de él. Cuando un nuevo agente aparece, los ya existentes buscan en el *DF Agent*³ las coordenadas del nuevo agente y comprueban que se encuentra lo suficientemente próximo como para incluirlo en su entorno. En caso contrario, lo omitirán.

El objetivo que persigue este agente es la minimización del coste eléctrico dentro de la micro-red. Para ello, primero selecciona las fuentes de energía más baratas de su micro-red y luego busca en las otras micro-redes alguna fuente aún más barata. Si la encuentra, puja por ella en una subasta pública en la que participan otras micro-redes.

³ El DF Agent recibe el nombre de páginas amarillas. Viene por defecto en la plataforma multi-agente. Cada agente, a parte de poder registrar los servicios que ofrece, puede buscar que servicios se ofrecen en la plataforma y el agente que los proporciona

3.2.2 Agentes reales

- **Agente instalado en un generador**

En cada generador hay un agente que los gestiona. Su única habilidad, es la obtención de los datos de generación de energía y su precio de venta. Una vez recopilados, envía esta información al *agente de coste mínimo* de la micro-red.

Su entorno de trabajo se reduce al de la micro-red. Es decir, este tipo de agente solo se comunica con agentes que se encuentran dentro de la micro-red. Sin embargo, puede vender energía a otras micro-redes a través del agente de mínimo coste, en la subasta pública que éste realiza.

El objetivo que persigue es la entrega de datos al agente de coste mínimo.

- **Agente instalado en un punto de demanda**

Estos agentes tienen como habilidad principal la de detectar el consumo que se necesita en el punto en el que están instalados. Después, estos agentes le envían la información al *agente de mínimo coste* para que éste pueda calcular la demanda total. Además, es capaz de cortar una cantidad de carga cuando es requerido por el *agente de mínimo coste*. El agente es capaz de elegir qué tipo de carga cortar (refrigeración, luz, etc.) para causar menos molestias al usuario.

El entorno de trabajo de este agente es la micro-red. Su objetivo es la entrega de datos al *agente de mínimo coste* y el de cortar una cantidad específica de carga cuando es requerido.

- **Agente instalado en una batería**

Estos agentes gestionan la carga y descarga de las baterías de una micro-red. Lo que se ha pretendido conseguir es que cada batería obtenga ganancias en la compraventa de energía eléctrica. Se va a explicar el proceso con la siguiente figura.

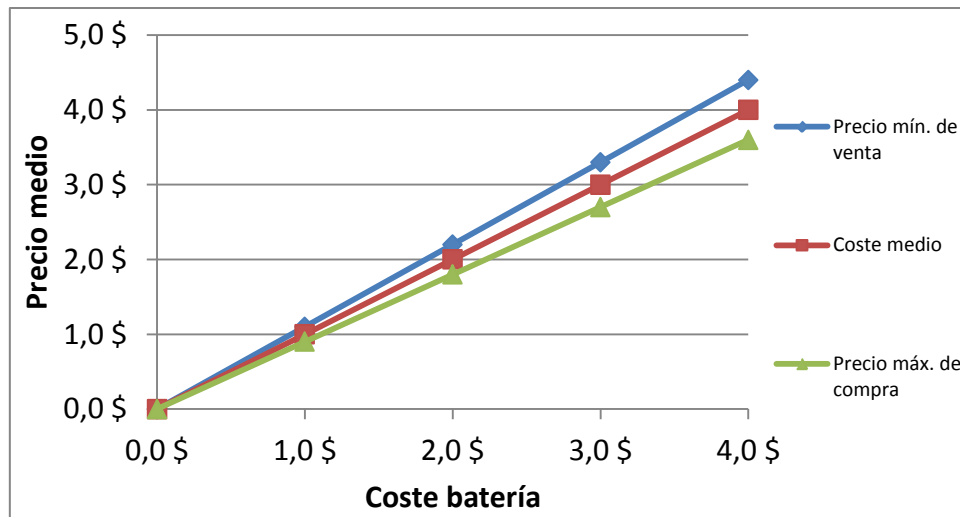


Figura 3.1 Precio medio de la energía en la micro-red frente al coste medio de la energía almacenada en una batería

Cada batería tiene calculado el coste medio de su energía almacenada. El precio mínimo de venta es el mínimo precio al que va a vender la batería. Se calcula multiplicando el coste medio por un factor mayor que uno. El precio máximo de compra es el máximo precio al que la batería va a comprar energía. Se calcula multiplicando el coste medio por un factor entre uno y cinco.

Periódicamente, el *agente de mínimo coste* le envía a la batería el precio medio de la energía en la micro-red. Dependiendo de este precio medio el agente decide lo siguiente:

- Si este precio medio es inferior al precio de máximo de compra, la batería compra energía.
- Si el precio medio es superior al precio mínimo de venta, la batería vende energía.
- Si el precio medio se encuentra entre el precio mínimo de venta y el precio de máximo de compra, la batería no hace nada.

Después de la compraventa, la batería actualiza su coste medio, preparándose así para el siguiente periodo. De esta forma nos aseguramos que el agente venderá la energía más cara de lo que le ha costado.

El agente, vende toda la energía disponible en la batería hasta que tan solo queda un veinte por ciento de la capacidad total. Esta reserva de energía se guarda para usarse en casos de emergencia.

El entorno de este agente es el mismo que el del agente instalado en un generador. Solo se comunica con agentes de la misma micro-red aunque puede vender energía a otras micro-redes. Esta venta, se hace a través del *agente de mínimo coste* cuando realiza la subasta pública.

El objetivo de este agente es asegurar una ganancia económica en la compraventa de energía eléctrica. También, sirve como apoyo en casos de emergencia en los que la micro-red necesita energía extra.

- **Agente instalado en un FACT, tap changer, conversor o generador síncrono.**

Este tipo agente se instala en dispositivos que son capaces de inyectar o absorber energía reactiva. Su principal habilidad, es asegurar que la tensión en todos los buses de la micro-red se encuentren dentro del rango establecido. Mediante la coordinación entre agentes, se consigue estabilizar la tensión en la micro-red ejecutando acciones locales.

El entorno de este agente es reducido ya que la inyección o absorción de energía reactiva en un bus tan solo altera la tensión de los buses que están relativamente cerca. Previamente, se divide la micro-red en zonas y se estudia en cuáles el agente puede tener cierta influencia sobre la tensión. Esas zonas serán el entorno del agente.

El objetivo de este agente es mantener la tensión dentro de un rango preestablecido. Para ello, realiza acciones locales y solicita ayuda a los agentes del mismo entorno que estén persiguiendo el mismo objetivo. Cómo se ha desarrollado este agente, sus objetivos y cómo se ha construido su algoritmo se explica detalladamente en el capítulo 6 de la memoria.

- **Agente instalado en un bus**

Este tipo de agentes son capaces de calcular el flujo eléctrico. La técnica que se usa es la de inyección de corrientes. Cómo se ha desarrollado el código, las simulaciones y sus resultados se muestran en el capítulo 5.

El entorno de este agente es bastante limitado. Se reduce al propio bus, al bus al que está inmediatamente conectado *upstream*, y los buses que tiene inmediatamente conectados *downstream*. En la siguiente figura se muestra el ejemplo del entorno de un agente de este tipo.

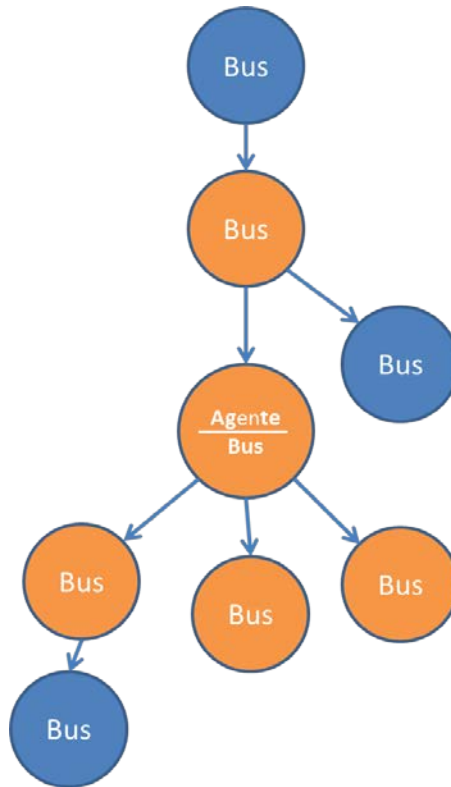


Figura 3.2 Entorno de un agente instalado en un bus

El objetivo de este agente se reduce al cálculo del flujo eléctrico de la micro-red.

Algoritmo	Agente de/asentado en	Real	Abstracto	Capacidades principales	Entorno	Objetivos
Mínimo coste	Mínimo coste		X	<ul style="list-style-type: none"> - Ordenar de menor a mayor la lista de precios - Detectar un exceso demanda - Comprar/vender en subastas de su entorno 	La propia micro-red y micro-redes cercanas	- Obtención del mínimo coste
	Generador	X		<ul style="list-style-type: none"> - Obtener y almacenar una lista de energía generada y su precio 	La propia micro-red	- Enviar la información recopilada al agente de mínimo coste
	Punto de Demanda	X		<ul style="list-style-type: none"> - Detectar cuanta demanda se necesita en ese punto y de que tipo es (refrigeración, iluminación...) - Cortar una cantidad de demanda afectando solo a un tipo de ella 	La propia micro-red	<ul style="list-style-type: none"> - Enviar la información recopilada al agente de mínimo coste - Cortar demanda cuando le es exigido
	Batería	X		<ul style="list-style-type: none"> - Calcular y actualizar el coste medio de la energía almacenada - Decidir cuando comprar o vender energía 	La propia micro-red	- Obtener una ganancia en la compraventa de energía de energía eléctrica
Cálculo del flujo eléctrico	Bus	X		<ul style="list-style-type: none"> - Calcular del flujo eléctrico 	Ver Figura 3.4	- El cálculo del flujo eléctrico
Control secundario de voltaje	FACT, tap changer, convertor o generador síncrono	X		<ul style="list-style-type: none"> - Medir el voltaje en los buses que controla - Controlar la inyección y/o absorción de energía reactiva en el bus que está instalado - Ayudar a los compañeros de su entorno 	Buses próximos al que está instalado el agente	- Realizar un control secundario de voltaje

Tabla 3.1 Resumen de la estructura del SMA, capacidades principales, entorno y objetivos

Algoritmo del cálculo del mínimo coste

Los agentes que forman el algoritmo de mínimo coste han sido presentados en el capítulo 3. En este capítulo, vamos a describir en profundidad cómo ha sido desarrollado este algoritmo, mostrando los comportamientos y métodos más importantes. La descripción que aparece abajo está bastante simplificada. Si se quiere ampliar la información, en el Anexo III aparecen detalladamente explicados los métodos y comportamientos principales de este método.

Además, se va a presentar los ejemplos realizados para su validación. Luego, se estudiarán los resultados para ver su eficacia.

4.1 Estructura del algoritmo

El mayor peso de este algoritmo recae sobre el *agente de mínimo coste (AMC)*, por lo que solo se va a explicar la estructura de éste. Los demás agentes, tan solo, recopilan información local y la envían al *AMC* cuando se les pide.

Para el entendimiento del algoritmo, se ha creado la Tabla 4.1 donde se detallan todos los componentes principales del algoritmo.

Componente	Nombre	Utilidad	Hace uso de...
Vector	Dispatcher	<ul style="list-style-type: none"> Almacena la información de generación y precio de la energía de todos los generadores de la micro-red 	
	Tidied	<ul style="list-style-type: none"> Almacena la generación, de precio mínimo, escogida para satisfacer la demanda-red. 	
	notUsed	<ul style="list-style-type: none"> Almacena la generación no usada para satisfacer la demanda de la micro-red. 	
Método	Minimize	<ul style="list-style-type: none"> Ordena de menor a mayor el vector introducido en la declaración y genera con ellos los vectores <i>tidied</i> y <i>notUsed</i>. Retorna el valor de la demanda que no ha sido copada. 	<ul style="list-style-type: none"> <i>dispatcher</i> <i>tidied</i> <i>notUsed</i>
	MinimizeWithbatteries	<ul style="list-style-type: none"> Ordena de menor a mayor el vector introducido en la declaración, teniendo en cuenta la decisión de las baterías, y genera los vectores <i>tidied</i> y <i>notUsed</i>. Retorna el valor de la demanda que no ha sido copada. 	<ul style="list-style-type: none"> <i>dispatcher</i> <i>tidied</i> <i>notUsed</i> <i>Minimize</i>
	cuttingOffDemand	<ul style="list-style-type: none"> Envía un mensaje pidiendo a los agentes en los puntos de demanda que corten una cantidad de carga 	
	updatingBatteries	<ul style="list-style-type: none"> Si ha habido una compra o venta de energía por parte de una batería, este método le envía un mensaje para informarle. 	<ul style="list-style-type: none"> <i>tidied</i>
	AccepProposal	<ul style="list-style-type: none"> Este método detecta si alguno de los elementos de <i>tidied</i> pertenece a otra micro-red para enviarle un mensaje pujando por dicho elemento 	<ul style="list-style-type: none"> <i>Tidied</i>

Componente	Nombre	Utilidad	Hace uso de...
Comportamiento	AMSSuscriber	<ul style="list-style-type: none"> • Detecta el entorno y es sensible a sus cambios 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>tidied</i>
	intiationBehaviour	<ul style="list-style-type: none"> • Envía un mensaje a un agente, cuyo nombre ha sido introducido en la declaración del comportamiento, requiriéndole su información 	
	MailBoxBehaviour	<ul style="list-style-type: none"> • Este comportamiento espera mensajes y según el tipo que sea los procesa de una manera u otra 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>dispatchers</i>
	PowerExchangeBehaviour	<ul style="list-style-type: none"> • Este comportamiento se encarga de realizar una subasta en la que participan otras micro-redes 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>dispatcher</i> • <i>tidied</i> • <i>notUsed</i> • <i>Minimize</i> • <i>AccepProposal</i> • <i>updatingBatteries</i> • <i>cuttingOffDemand</i>

Tabla 4.1 Resumen de los vectores, métodos y comportamientos principales del AMC

La estructura que sigue el algoritmo en esta versión sirve tan solo para mostrar los resultados. Al iniciarse, el comportamiento *AMSSuscriber* se encarga de detectar el entorno del *AMC* y sus variaciones. El comportamiento *IntactingWithGui* es el que espera mensajes de la interfaz del usuario para ejecutar el algoritmo. Según el mensaje que reciba. Ejecuta los siguientes métodos y comportamientos:

- *Minimize, cuttingOffDemand*. El primero se usa para minimizar el vector que le es pasado a través de la declaración del método. Si toda la demanda no ha sido satisfecha se ejecuta el último método para cortarla.
- *MinimizeWithBatteries, updatingBatteries y cuttingOffDemand*. El primer método se usa para minimizar el vector que le es pasado a través de la declaración, teniendo en cuenta las baterías. Después actualiza el estado de las baterías y, si hay demanda que no ha sido satisfecha se ejecuta el último método para cortarla.
- *MinimizeWithBatteries, PowerExchangebehaviou*. El primer método se utiliza para inicializar los vectores que luego serán utilizados en el comportamiento. El comportamiento, se encarga él mismo de llamar a *updatingBatteries y cuttingOffDemand* si es necesario.

4.2 Ejemplos y resultados

En este apartado vamos a mostrar dos casos distintos de estudio. El primer caso es un ejemplo basado en una micro-red real, que tiene una batería. El segundo caso esta formado por cuatro micro-redes en el que se podrá observar como se desarrolla una subasta pública. Para un mejor entendimiento, en el Anexo IV donde se presenta el caso de estudio más sencillo: una micro-red sin baterías. En el Anexo IX se muestra el flujo de mensajes que ocurre en el caso 2.

4.2.1 Caso 1

En este caso vamos a simular el comportamiento de una micro-red real. Está instalada en Valdabra (Huesca) y está formada por tres bombas de riego, un aerogenerador y una bomba reversible que hace la función de batería.

Cada bomba de riego consume 110 kW, por lo que la demanda total será de 330 kW cuando las tres bombas estén en funcionamiento. El generador produce 250 kW y la bomba reversible, según el precio medio de la energía comprará o venderá energía. Se van a simular dos escenarios. En los dos, las tres bombas de riego van a estar encendidas. En el primer escenario, la bomba reversible venderá energía a la micro-red mientras que en el segundo ni comprará ni venderá. Vamos a ver el primer escenario.

• **Caso 1.1**

Los datos iniciales se muestran en la siguiente tabla.

Generación				
Nombre	Energía ofertada (kWh)	Precio (€/kWh)		
Molino 1	250	0.10		
Total	250			
Batería (bomba reversible)				
Nombre	Energía almacenada (kWh)	Precio medio de la energía almacenada (€/kWh)	Precio mínimo de venta (€/kWh)	Precio máximo de compra (€/kWh)
Bomba reversible	300	0.08	0.088	0.072
Consumo				
Nombre	Demanda de la bomba 1 (kWh)	Demanda de la bomba 2 (kWh)	Demanda de la bomba 3 (kWh)	Demanda total (kWh)
Bombas de riego	110	110	110	330
Total				330

Tabla 4.2 Datos iniciales del caso 1.1

El resultado esperado es que la bomba reversible venda energía ya que el precio medio de la energía es de 0.10 €/kWh, valor superior al precio mínimo de venta. A continuación se muestran las tablas con los resultados de la simulación

Energía seleccionada		
Nombre	Energía ofertada (kWh)	Precio (€/kWh)
Bomba reversible	200	0.088
Molino 1	130	0.10
Total	330	
Demanda total	330	
Energía desechada		
Nombre	Energía ofertada (kWh)	Precio (€/kWh)
Fotovoltaico 1	120	0.10
Total	120	

Tabla 4.3 Resultados del caso 1.1

- **Caso 1.2**

En este caso, se han cambiado los datos de la bomba reversible. Los datos iniciales son

Generación		
Nombre	Energía ofertada (kWh)	Precio (€/kWh)
Molino 1	250	0.10
Total	2615	

Batería (bomba reversible)				
Nombre	Energía almacenada (kWh)	Precio medio de la energía almacenada (€/kWh)	Precio mínimo de venta (€/kWh)	Precio máximo de compra (€/kWh)
Bomba reversible	300	0.095	0.145	0.0885
Consumo				
Nombre	Demanda de la bomba 1 (kWh)	Demanda de la bomba 2 (kWh)	Demanda de la bomba 3 (kWh)	Demanda total (kWh)
Bombas de riego	110	110	110	330
Total				330

Tabla 4.4 Datos iniciales del caso 1.2

El resultado esperado es que la bomba reversible ni venda ni compre energía ya que el precio medio de la energía es de 0.10 €/kWh, valor comprendido entre el precio mínimo de venta y el precio máximo de compra. A continuación se muestran las tablas con los resultados de la simulación

Energía seleccionada		
Nombre	Energía ofertada (kWh)	Precio (€/kWh)
Molino 1	250	0.10
Total	250	
Demanda total	330	

Tabla 4.5 Resultados del caso 1.2

Como se puede apreciar la generación total no satisface la demanda por lo que en este caso, el AMC envía un mensaje al agente en el punto de demanda para que reduzca y se equilibre con la generación. En la siguiente tabla vemos cómo ha actuado el agente en el punto de demanda.

Consumo tras el corte de carga				
Nombre	Demanda de la bomba 1 (kWh)	Demanda de la bomba 2 (kWh)	Demanda de la bomba 3 (kWh)	Demanda total (kWh)
Bombas de riego	110	110	30	250
Demanda Total				250

Tabla 4.6 Demanda final tras el corte de carga.

Limitando el consumo de la bomba 3 a 30 kWh se consigue que la generación y el consumo se equilibren.

4.2.2 Caso 2

En este caso vamos a simular el comportamiento de cuatro micro-redes. Para reducir el tamaño de las tablas se ha agrupado toda la generación y demanda de cada micro-red.

Al realizar la subasta pública, cada micro-red solo la realiza con otras micro-redes que estén próximas. En nuestro ejemplo, las micro-red 1 y 2 realizarán la subasta con todas las micro-redes, mientras que las micro-red 4 y 3 solo la realizarán con las micro-redes 1 y 2. En la figura 4.3 se muestra mediante líneas azules qué micro-redes están en contacto para realizar la subasta.

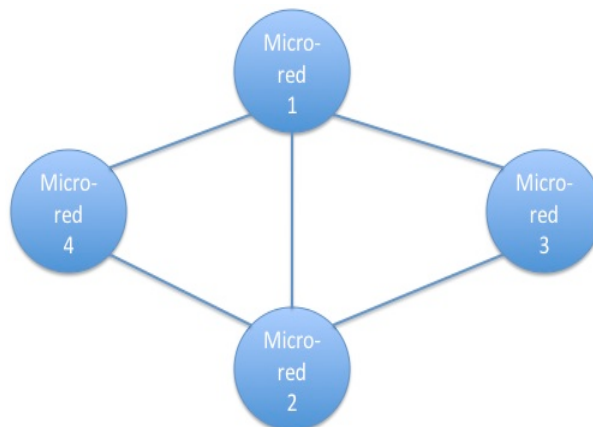


Figura 4.1 Esquema que indica que micro-redes están conectadas entre sí

La distancia entre micro-redes es muy importante a la hora de la subasta, ya que cada micro-red va a querer vender a la que esté más cerca. En la siguiente tabla mostramos la distancia entre micro-redes. La micro-red 3 y la micro-red 4 al estar muy lejos entre ellas, no van intercambiar energía.

Distancia entre Micro-redes (km)				
	Micro-red 1	Micro-red 2	Micro-red 3	Micro-red 4
Micro-red 1	-			
Micro-red 2	42.42	-		
Micro-red 3	98.99	56.56	-	
Micro-red 4	42.42	84.85	No conectadas	-

Tabla 4.7 Distancia entre micro-redes

Los datos iniciales de generación, demanda y sobre las baterías de cada micro-red se enseñan en la Tabla 4.8. Solo hay una batería por micro-red. Primero, se va a lanzar toda la plataforma multi-agente. Luego, los agentes detectarán su entorno y quién está dentro de él. Justo después es cuando se podrá iniciar el comportamiento que realiza la subasta pública.

Generación		
Nombre	Energía ofertada (kWh)	Precio (€/kWh)
Micro-red 1	200	0.09
	250	0.10
	350	0.105
Micro-red 2	150	0.085
	200	0.09
	350	0.105
Micro-red 3	250	0.10
	350	0.11
	150	0.115
Micro-red 4	250	0.10
	200	0.11

Batería					
Nombre	Origen	Energía almacenada (kWh)	Precio medio de la energía almacenada (€/kWh)	Precio mínimo de venta (€/kWh)	Precio máximo de compra (€/kWh)
Bat1	Micro-red 1	300	0.095	0.1045	0.0855
Bat2	Micro-red 2	300	0.095	0.1045	0.0855
Bat3	Micro-red 3	300	0.12	0.132	0.108
Bat4	Micro-red 4	300	0.08	0.132	0.108
Consumo					
Nombre	Demanda de iluminación (kWh)	Demanda de cocina (kWh)	Demanda de refrigeración (kWh)	Demanda total (kWh)	
Micro-red 1	300	200	100	600	
Micro-red 2	300	200	100	600	
Micro-red 3	300	200	100	600	
Micro-red 4	300	200	100	600	

Tabla 4.8 Datos iniciales del caso 2

Primero, cada micro-red intentará copar su demanda con la energía propia de la micro-red. Después, buscará en otras micro-redes de su entorno alguna fuente de energía más barata a la vez que ofrece su energía en una subasta pública. En este caso, cada micro-red puede satisfacer toda su demanda menos la micro-red 4. Esta micro-red intentará comprar energía en la subasta para abastecer toda la demanda.

En lo que respecta a las baterías, tan solo las de las micro-redes 3 y 4 realizan acciones. La batería de la micro-red 3, decide comprar 100kWh de

energía mientras que la Bat4 decide vender 100kWh. Las baterías Bat1 y Bat2 deciden no hacer nada en este periodo.

En lo que respecta a la subasta, se va a presentar dos tablas. En la primera se va a mostrar el primer paso; como cada micro-red copa su demanda con su propia energía. También se va a mostrar la energía sobrante que va a ser subastada por cada micro-red. Luego se mostrará la tabla final, una vez realizada la subasta.

Nombre	Energía...	Energía comprada (kWh)	Precio (€/kWh)	Origen (€/kWh)
Micro-red 1	Seleccionada	200	0.09	Micro-red 1
	Seleccionada	250	0.10	Micro-red 1
	Seleccionada	150	0.105	Micro-red 1
	Total seleccionada	600		
	Demanda	600		
	No usada	200	0.105	Micro-red 1
Micro-red 2	Seleccionada	150	0.085	Micro-red 2
	Seleccionada	200	0.09	Micro-red 2
	Seleccionada	250	0.105	Micro-red 2
	Total seleccionada	600		
	Demanda	600		
	No usada	100	0.105	Micro-red 2
Micro-red 3	Seleccionada	250	0.1	Micro-red 3
	Seleccionada	350	0.11	Micro-red 3
	Seleccionada	100	0.115	Micro-red 3
	Total seleccionada	700		
	Demanda	700		
	No usada	50	0.115	Micro-red 3

Nombre	Energía...	Energía comprada (kWh)	Precio (€/kWh)	Origen (€/kWh)
Micro-red 4	Seleccionada	100	0.088	Bat4
	Seleccionada	250	0.1	Micro-red 4
	Seleccionada	200	0.11	Micro-red 4
	Total seleccionada	550		
	Demanda	600		

Tabla 4.9 Estado del algoritmo tras el método *MinimizeWithBatteries*

Tras el primer paso, todas las micro-redes satisfacen su demanda menos la 4. Hay que tener en cuenta que en la micro-red 3 se ha aumentado la demanda en 100kWh, debido a la batería. Después de este paso, todas las micro-redes van a subastar la energía *No usada*.

En la siguiente tabla se muestra la energía seleccionada por cada micro-red que hace el coste mínimo. En la energía seleccionada se muestra si dicha energía pertenece a la micro-red o si ha sido comprada a otra micro-red del entorno.

Nombre	Energía...	Energía comprada (kWh)	Precio (€/kWh)	Origen (€/kWh)
Micro-red 1	Seleccionada	200	0.09	Micro-red 1
	Seleccionada	250	0.10	Micro-red 1
	Seleccionada	150	0.105	Micro-red 1
	Total seleccionada	600		
	Demanda	600		
Micro-red 2	Seleccionada	150	0.085	Micro-red 2
	Seleccionada	200	0.09	Micro-red 2
	Seleccionada	250	0.105	Micro-red 2
	Total seleccionada	600		
	Demanda	600		

Nombre	Energía...	Energía comprada (kWh)	Precio (€/kWh)	Origen (€/kWh)
Micro-red 3	Seleccionada	250	0.1	Micro-red 3
	Seleccionada	50	0.105	Micro-red 1
	Seleccionada	100	0.105	Micro-red 2
	Seleccionada	300	0.11	Micro-red 3
	Total seleccionada	700		
	Demanda	700		
	No usada	50	0.1	Micro-red 3
	No usada	150	0.115	Micro-red 3
Micro-red 4	Seleccionada	100	0.088	Bat4
	Seleccionada	250	0.10	Micro-red 4
	Seleccionada	150	0.105	Micro-red 1
	Seleccionada	100	0.1	Micro-red 4
	Total seleccionada	600		
	Demanda	600		
	No usada	100	0.11	Micro-red 4

Tabla 4.10 Datos finales del caso 2.

Como se puede observar, la micro-red 3 ha podido minimizar más el precio que paga por la energía. Lo ha conseguido comprando en la subasta la energía que no usaban las micro-redes 1 y 2. La micro-red 4, ha comprado energía a la micro-red 1 con dos motivos, el primero para poder satisfacer toda la demanda y la segundo para poder minimizar más su precio.

Este caso se ha ejecutado varias veces, y el tiempo medio de ejecución ha sido de 97 milisegundos.

Algoritmo del cálculo del flujo eléctrico

Este algoritmo calcula el flujo eléctrico de una micro-red de tipo lineal o radial. El método de resolución usado es el de Inyección de Corrientes. El cálculo del flujo eléctrico es muy importante en la micro-red a la hora de intentar reducir pérdidas innecesarias en la red.

Se ha conseguido implantar este método para crear un sistema de cálculo de flujo de manera distribuida. Para ello, se han creado dos agentes. El primero de ellos situado en el bus de la frontera de la micro-red, llamado agente primario, que es el que inicia el algoritmo y el que lo detiene. El otro tipo de agente, llamado secundario, se instala en el resto de buses y realiza los cálculos y operaciones necesarias para la consecución del resultado.

5.1 Estructura del algoritmo

Para entender el funcionamiento de este algoritmo es imprescindible conocer el método de Inyección de Corrientes para calcular el flujo eléctrico en redes radiales.

De forma resumida, el algoritmo en cada iteración hace un barrido de la micro-red desde el bus frontera hacia abajo y desde abajo hasta el bus frontera. En el primer barrido, actualiza los voltajes en cada bus mientras que en el segundo actualiza la corriente eléctrica en cada línea. Cuando acaba la iteración, el agente primario decide si se ha de realizar otra iteración o no.⁴

Este algoritmo, a diferencia de los otros dos presentados en el PFC, utiliza una ontología para el envío de mensajes. Una ontología no es más que un conjunto de léxico que entiende cada agente del algoritmo, haciendo más sencillo el envío de mensajes, ya que el contenido de ellos se puede tratar como objetos Java.

Antes de entrar en materia, hay que mencionar que cada agente secundario almacena en una variable el valor de la tensión en el bus que está instalado y la corriente eléctrica de línea comprendida entre el bus y el bus que está *upstream*.

Para que funcione el algoritmo correctamente, hay que conseguir que se haga un barrido de arriba a abajo y de abajo a arriba. Para lograrlo, se delimita el entorno del

⁴ En el Anexo VI hay un ejemplo de cómo se ejecuta este algoritmo paso a paso, pretendiendo explicar el método de Inyección de Corriente y cómo se realizan los barridos

agente tal y como se muestra en la Figura 3.2. Sin embargo, es necesario que cada agente sepa que agente está *upstream* y cuales *downstream*. Para conseguirlo, el primer agente que se crea en la micro-red es el primario, que es el que está instalado en el bus de la frontera. El resto de agentes que se crean son secundarios. Cuando se instalan en un bus, envían un mensaje al agente que está inmediatamente *upstream* para informarle de su aparición. Luego, esperan mensajes por si algún agente secundario se instala inmediatamente *dowstream*. De esta manera, cada agente sabe el bus que tiene arriba y abajo. Se muestra un esquema de cómo funciona esta idea. En la primera figura, solo hay un agente y está esperando mensajes.



Figura 5.1 Creación del Agente1

En la siguiente figura, *Agente2* aparece y le envía un mensaje a *Agente1* indicándole que está inmediatamente aguas abajo.

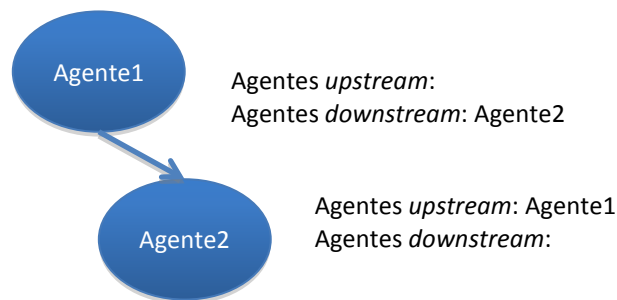


Figura 5.2 Creación del Agente2

En la última figura, aparecen dos agentes, uno se conecta a *Agente1* mientras que el otro se conecta a *Agente2*.

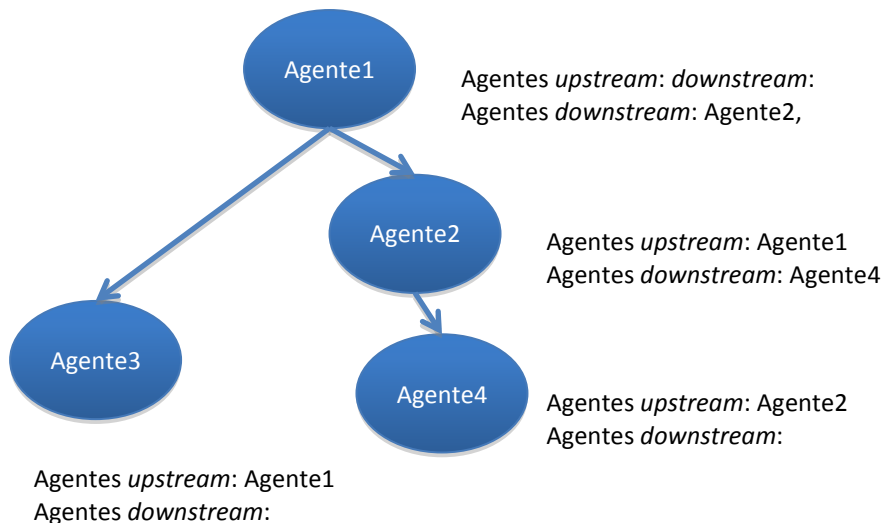


Figura 5.3 Creación de los agentes Agente3 y Agente4

Una vez que hay un agente instalado en cada bus, se inicia el algoritmo. El agente primario es el que se encarga de ello. Se empieza enviando un mensaje con sentido aguas abajo. Cuando lo recibe un agente recalcula el voltaje y lo envía a los agentes que tiene *downstream*. De esta forma el mensaje se va extendiendo por toda la micro-red. Cuando un agente no tiene más agente *downstream*, como el agente 4 de la Figura 5.3, recalcula la intensidad y envía un mensaje al agente que está *upstream*. De esta forma se inicia el barrido de abajo hacia arriba.

Cuando se recalcula la tensión, se compara con la de la iteración anterior, siendo la diferencia entre ellas el error cometido. Este error se envía también con los mensajes, almacenándose siempre el más grande. Cuando acaba la iteración, el último mensaje es recibido por el agente primario y analiza este error. Si el error es mayor que la tolerancia permitida se inicia una nueva iteración.

Para ampliar la información, en el Anexo V vienen explicados detalladamente los métodos y comportamientos principales de este algoritmo

5.2 Ejemplos y resultados

En este apartado vamos a mostrar el siguiente caso de estudio. Se trata de una red de 23 buses. Se trata de un sistema real a un nivel de tensión de 34.5 kV y una potencia base de 100 kVA, cuyo diagrama unifilar se muestra en la Figura 5.4. Los datos se presentan en la Tabla 5.1.

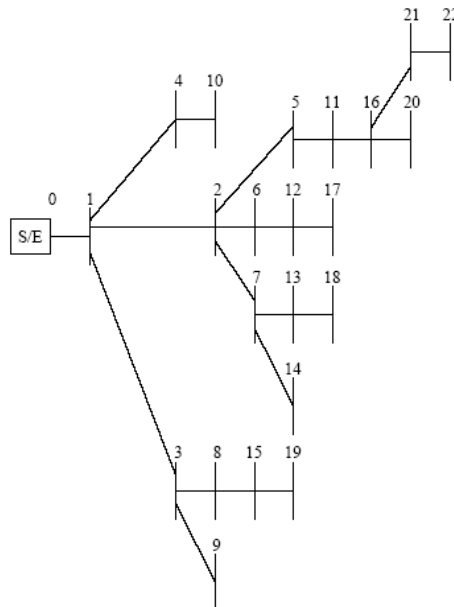


Figura 5.4 Esquema unifilar del caso de estudio

Cargas			Impedancias			
Bus	P (kVA)	Q (kVAr)	Ni	Nf	R (ohm)	X (Ohm)
0	0	0	0	1	0.11642	0.10474
1	256	192	1	2	0.24755	0.22271
2	256	192	1	3	0.34271	0.30833
3	256	192	1	4	0.40169	0.36139
4	256	192	2	5	0.47107	0.42382
5	256	192	2	6	0.25820	0.23230
6	256	192	2	7	0.28000	0.25191
7	256	192	3	8	0.31972	0.28765
8	256	192	3	9	0.33566	0.30199
9	256	192	4	10	0.28910	0.26010
10	256	192	5	11	0.47127	0.42400
11	256	192	6	12	0.25413	0.22863
12	256	192	7	13	0.36922	0.33218
13	256	192	7	14	0.39090	0.35169
14	256	192	8	15	0.36835	0.33140
15	256	192	11	16	0.39554	0.35587
16	256	192	12	17	0.32902	0.29601
17	256	192	13	18	0.54163	0.48730
18	256	192	15	19	0.29108	0.26188
19	256	192	16	20	0.04355	0.03918
20	0	0	16	21	1.18479	1.06594
21	256	192	21	22	1.04856	0.94337
22	512	384	-	-	-	-

Tabla 5.1 Datos iniciales del caso de estudio

La tolerancia que se ha usado para resolver este caso de estudio ha sido la siguiente:

$$Tolerancia = 0.0000001$$

El algoritmo ha necesitado de cinco iteraciones y ha necesitado 236 milisegundos para calcular el flujo. En la Figura 5.5 se muestra el valor del voltaje en los buses 17, 20 y 22. Se ha escogido estos buses por que son los que están más alejados del bus frontera, y por tanto donde más caída de tensión se va a producir.

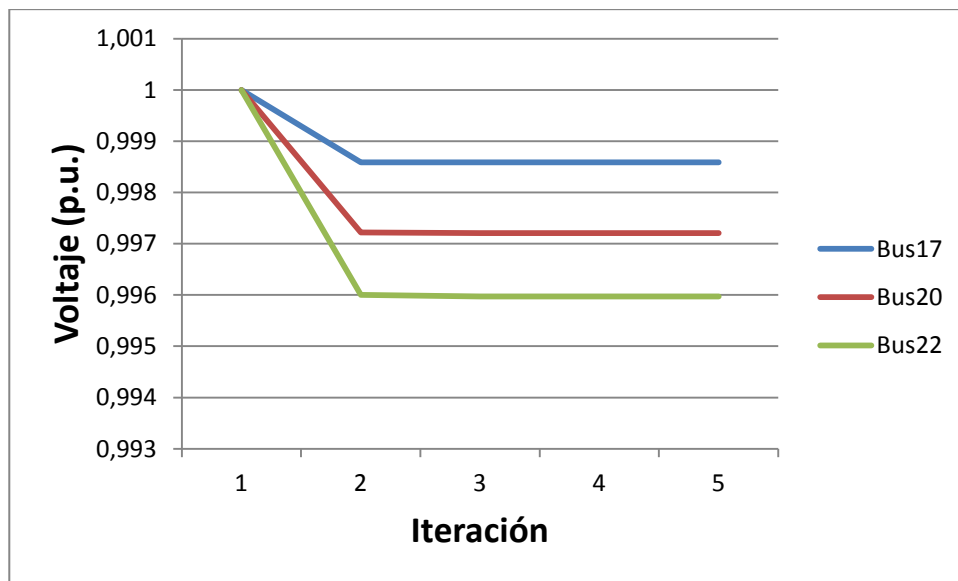


Figura 5.5 Esquema unifilar del caso de estudio

Como se puede observar, en la segunda iteración el algoritmo ha alcanzado prácticamente la solución. Sin embargo, necesita de tres iteraciones más debido a que la tolerancia introducida es muy pequeña.

A continuación se muestran los resultados en todos los buses de la micro-red. el documento donde se extrajo este caso de estudio viene acompañado de la tensión en cada bus. Por lo que en la Tabla 5.2 se va a comparar el resultado obtenido mediante este algoritmo y el resultado ofrecido por el documento.

Bus	Voltaje calculado (p.u.)	Voltaje documento (p.u.)	Error
0	1	1	0
1	0,999705797	0,999075362	0,000630435
2	0,999169507	0,99782029	0,001349217
3	0,999211507	0,998455072	0,000756435

Bus	Voltaje calculado (p.u.)	Voltaje documento (p.u.)	Error
4	0,999416319	0,998785507	0,000630812
5	0,998318609	0,996797101	0,001521507
6	0,998890145	0,997542029	0,001348116
7	0,998866522	0,997417391	0,00144913
8	0,998865594	0,998110145	0,000755449
9	0,999090435	0,998336232	0,000754203
10	0,999312058	0,998681159	0,000630899
11	0,997637391	0,995944928	0,001692464
12	0,99870687	0,99735942	0,001347449
13	0,998600087	0,997150725	0,001449362
14	0,998725507	0,997275362	0,001450145
15	0,998599855	0,997843478	0,000756377
16	0,997208406	0,995371014	0,001837391
17	0,998588203	0,99724058	0,001347623
18	0,998404783	0,996953623	0,001451159
19	0,998494783	0,99773913	0,000755652
20	0,997208348	0,995371014	0,001837333
21	0,996351594	0,994081159	0,002270435
22	0,995972377	0,993321739	0,002650638
Error máximo			0,002650638

Tabla 5.2 Resultados finales del caso de estudio

Como se puede observar, el error máximo cometido por el algoritmo es muy pequeño.

Algoritmo del control secundario de voltaje

Como es bien sabido, en las redes eléctricas actuales el control de voltaje tiene dos o tres niveles jerarquizados. El primer nivel, control primario de voltaje, trata de compensar rápidas e impredecibles variaciones de voltaje manteniendo su salida cerca del nivel de referencia. El control secundario de voltaje, está diseñado para manejar variaciones grandes y lentas de voltaje. Este tipo de control es bastante útil para el sistema eléctrico ya que va variando los niveles de referencia a los que se tiene que ajustar el control primario. El nivel superior, control terciario de voltaje, recoge información global del sistema eléctrico y trata de optimizar ciertos aspectos de la red.

En este PFC, se presenta un control secundario de voltaje que va a hacer uso de dispositivos que puedan inyectar y/o absorber energía reactiva en la micro-red. Estos dispositivos son: FACTS, generadores síncronos y convertidores. La idea principal es que controlando la inyección o la absorción de energía reactiva en un punto de la micro-red se puede elevar o disminuir el voltaje de dicho punto y sus alrededores. De esta forma, se puede conseguir un control local en cada punto de la micro-red.

Además, también se ha incluido los Tap-changers ya que también permiten regular el voltaje. Este dispositivo es un transformador que tiene la habilidad de variar su número de espiras, pudiendo controlar así el voltaje en el devanado secundario.

6.1 Estructura del algoritmo

La idea fundamental de este algoritmo es la de controlar la energía reactiva que inyectamos o absorbemos en la micro-red con objetivo de incrementar o disminuir el valor de la tensión en un punto. Es por ello, que estos agentes van a controlar dispositivos capaces de regular la energía reactiva que aportan o extraen de la micro-red. Estos dispositivos van a estar distribuidos y, por tanto, van a tomar acciones locales para llegar a un objetivo global.

El entorno de este agente, va a ser menor que el tamaño de la micro-red. Previamente, se divide la micro-red en zonas. Cuando se va a instalar un agente de este tipo en un bus, se estudia en que zonas puede ejercer influencia sobre el voltaje mediante la inyección o absorción de energía reactiva. Estas zonas en las que logra cierta influencia sobre el voltaje, será el entorno del agente.

Este agente, es capaz de detectar los agentes que hay en su entorno y ser consciente, en tiempo real, de los cambios que se producen en él. Para conseguirlo,

cuando un agente de este tipo se crea, registra sus servicios en el *DF Agent*. Luego, busca otros agentes que ofrezcan el mismo servicio y estén localizados en alguna de las zonas en las que él opera. Una vez hallados, les envía un mensaje informándoles de que se ha incorporado en su entorno. Cuando un agente de este tipo se elimina, borra su registro del *DF Agent* y envía un mensaje a los agentes de su entorno para que no lo tengan en cuenta en operaciones futuras.

Cada agente puede controlar el voltaje de varios buses: en el que está asentado y los que están alrededor, ya que sobre ellos puede ejercer una influencia bastante directa. De esta forma, con unos pocos dispositivos se puede ejercer un control sobre todos los buses del sistema.

El comportamiento de este agente se puede resumir mediante los tres objetivos siguientes:

1. El agente no puede actuar más allá de sus límites físicos. Su máxima salida o entrada de energía reactiva está limitada por el dispositivo que controla.
2. El voltaje de los buses que controla el agente tiene que estar dentro del rango de seguridad establecido.
3. Ofrecer su ayuda cuando le es requerida por otros agentes del entorno.

El agente perseguirá estos objetivos por orden de prioridad. Es decir, perseguirá el objetivo tres, si y solo si no se quebrantan los objetivos uno y dos; y solo perseguirá el objetivo dos mientras no entra en contradicción con el objetivo uno. Por lo que, el funcionamiento del agente se puede resumir de la siguiente manera: mientras no se lleguen a los límites físicos del dispositivo, un agente va a ofrecer su ayuda a otros agentes del entorno a no ser que el voltaje de alguno de sus buses esté fuera del rango permitido.

Conforme a estos objetivos, la lógica del agente se puede explicar fácilmente mediante la Figura 6.1.

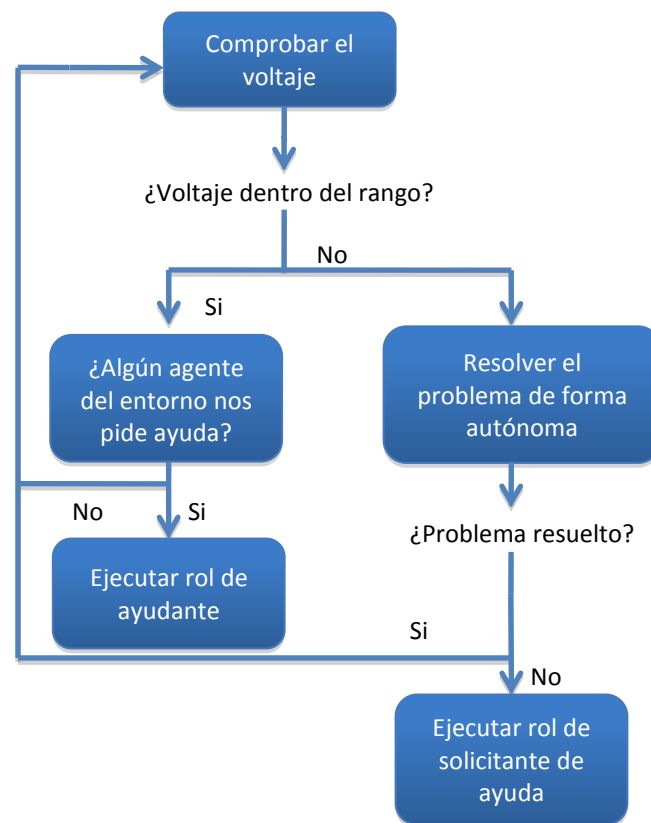


Figura 6.1 Esquema que ejemplifica la lógica del agente

La Figura 6.1 muestra de manera simplificada como funciona el agente. Como se puede observar, el agente puede ejecutar dos roles: el de solicitante de ayuda y el de ayudante. El primero de ellos se ejecuta cuando el agente detecta una violación de voltaje⁵ y no puede resolver el problema por si mismo. La lógica de este rol se ha dibujado en la Figura 6.2

⁵ Es decir, cuando el voltaje está fuera del rango establecido

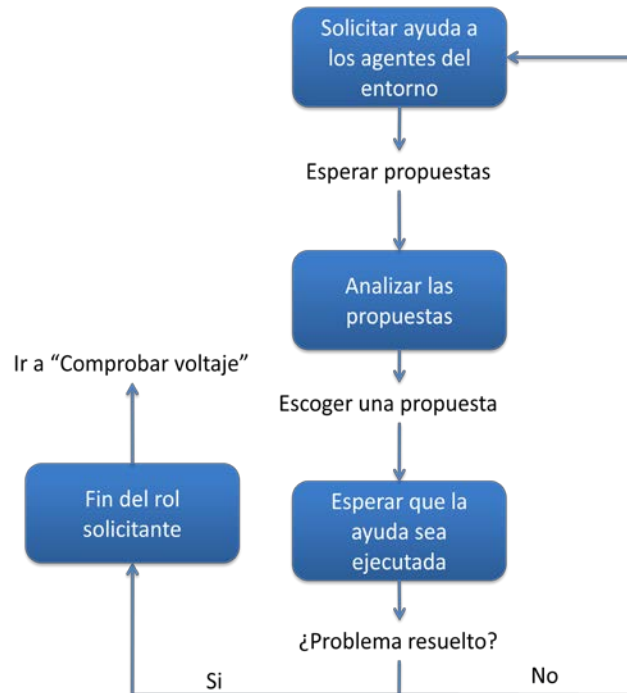


Figura 6.2 Esquema que muestra la lógica del Rol Solicitante

Como se ve en la Figura 6.2, el agente empieza pidiendo ayuda a los agentes del entorno. Analiza las propuestas recibidas y escoge una de ellas. Después de que la ayuda sea ejecutada, si el problema se ha resuelto, se acaba este rol y se va al estado de *Comprobar voltaje* de la Figura 6.1. En cambio, si el problema persiste, se vuelve a iniciar el rol, yendo al primer estado *Solicitar ayuda a los agentes del entorno*.

Para acabar este apartado, se va a explicar el rol de ayudante con ayuda de la Figura 6.3. Este rol es ejecutado cuando a un agente le pide ayuda otro agente del entorno.

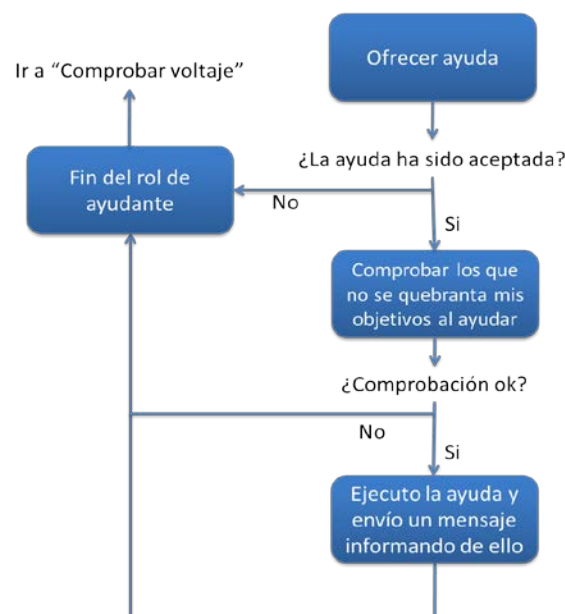


Figura 6.3 Esquema que muestra la lógica del Rol de Ayudante

En el primer estado se envía un mensaje proponiendo nuestra ayuda. Si la ayuda no ha sido aceptada, acabamos el rol y nos vamos al estado *Comprobar voltaje* de la Figura 6.1. Si la ayuda ha sido aceptada se comprueba que los objetivos no se quebrantan al ejecutar la ayuda. Si se quebrantan, se anula la ayuda y se acaba el rol de ayudante. Sin embargo, si se puede ayudar, se ejecuta la acción y se envía un mensaje informando de lo realizado. Después de esto, se acaba el rol de ayudante.

Los roles de ayudante y solicitante no son más que el protocolo *Contract Net Protocol* de FIPA, mostrado en la Figura 2.2. El rol ayudante corresponde a la parte *participant* de la figura mientras que el rol de solicitante corresponde a la parte *Initiator*.

Los métodos y comportamientos del algoritmo están ampliamente detallados en el Anexo VII

6.2 Ejemplos y resultados

En este apartado se va a exponer un caso de estudio. Para este caso de estudio se ha escogido una micro-red de seis buses que viene por defecto en Psat. Previamente, se ha estudiado en cuántas zonas se divide la micro-red y se han determinado tres. La primera incluye el *Bus4* y el *Bus5*. La segunda incluye los buses *Bus4*, *Bus5* y *Bus6*. La tercera, y última zona, incluye los buses *Bus5* y *Bus6*. Los buses *Bus1*, *Bus2* y *Bus3* no se han asociado a ninguna zona ya que en cada uno de ellos, al tener un elemento *PV.con* o *SW.con*, su voltaje se hace invariable. El modelo en Matlab se representa en la Figura 6.4.

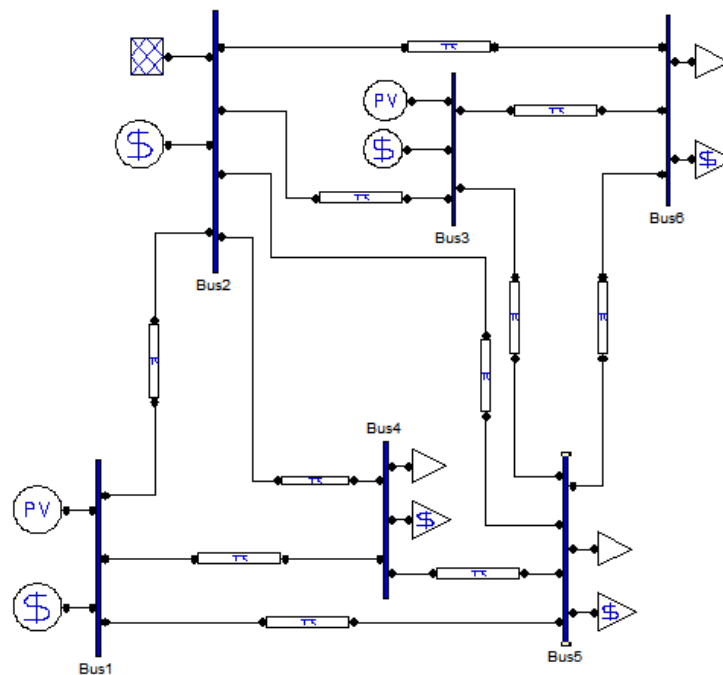


Figura 6.4 Micro-red del caso del estudio

Se ha instalado en *Bus5* y *Bus6* un agente de control secundario de voltaje en cada uno de ellos. Cada agente va a controlar únicamente el bus en el que están instalados. Estos agentes pertenecen a la misma zona.

Las cargas a alimentar en esta micro-red, están localizadas en los buses *Bus4*, *Bus5* y *Bus6*. El valor de cada una de ellas es el siguiente:

$$\begin{array}{ll} P_4 = 40 \text{ MVA} & Q_4 = -40 \text{ MVar} \\ P_5 = 40 \text{ MVA} & Q_5 = -50 \text{ MVar} \\ P_6 = 40 \text{ MVA} & Q_6 = -80 \text{ MVar} \end{array}$$

En nuestro ejemplo, el valor de P_6 va a pasar a valer cero. Esto va a provocar que la tensión en *Bus6* se eleve más de lo permitido⁶. En la Figura 6.5 se muestra el perfil de las tensiones en los buses *Bus4*, *Bus5* y *Bus6* durante toda la simulación

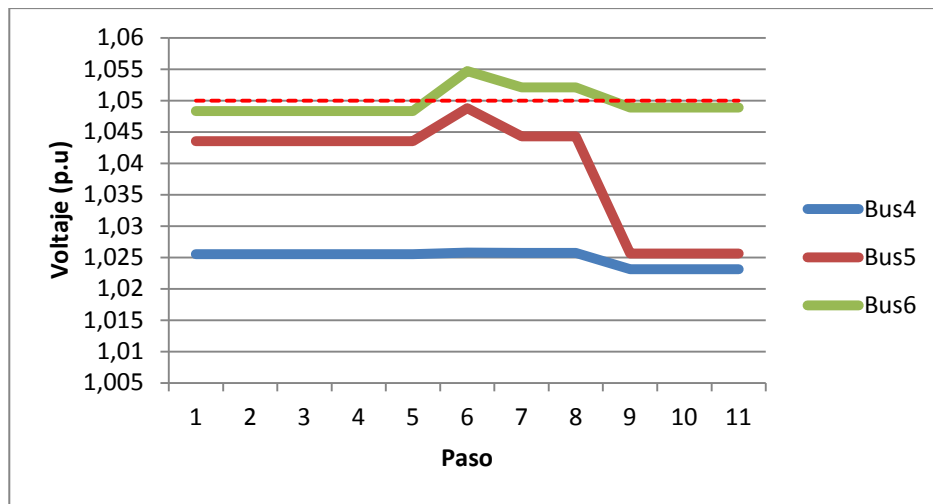


Figura 6.5 Perfil de las tensiones en los casos de estudio.

Cada paso equivale a un proceso y no a un tiempo específico. Durante los primeros 5 pasos, los agentes comprueban las tensiones de sus buses. Como están dentro del rango, no toman ninguna medida. En el paso 5, se produce el corte de la carga P_6 y la tensión sube por encima del nivel permitido en el *Bus6*, pintado mediante una línea roja punteada. En el paso 6, el agente del *Bus6* detecta el fallo y comienza a consumir energía reactiva y la tensión empieza a disminuir. Ya en el paso 7, el agente comprueba que aún la tensión está fuera del rango de seguridad por lo que pide ayuda a los agentes de la misma zona. El agente que está en el *Bus5* ofrece su ayuda y ésta es aceptada por *Bus6*. Cuando se ejecuta la ayuda, la tensión en *Bus6* cae esta vez dentro del rango de seguridad. Después de este paso, la situación vuelve a ser estable.

⁶ El rango de seguridad para la tensión es el $\pm 5\%$ de la tensión nominal, por lo que tensión mínima será de 0,95 p.u. y la máxima de 1,05 p.u.

Conclusiones y Líneas futuras

En este capítulo se va a hablar sobre las conclusiones obtenidas en el PFC y las líneas futuras de cada algoritmo. En la líneas futuras se va a comentar los próximos pasos que se deberían dar en cada algoritmo para continuar su desarrollo mientras que en las conclusiones se va a comentar la eficacia de los SMA para el control de micro-redes.

7.1 Conclusiones

En este PFC se han desarrollado tres algoritmos para el control en micro-redes, que son:

- El algoritmo del cálculo del mínimo coste eléctrico (ACMCE)
- El algoritmo del cálculo del flujo eléctrico (ACFE)
- El algoritmo del control secundario de voltaje (ACSV)

En el ACMCE se ha podido observar que los resultados que se ofrece en todos los casos son los esperados y que el tiempo de ejecución es reducido.

En ACFE se muestra que el flujo calculado es muy próximo al real. Estos datos luego pueden ser utilizados por otros agentes, como el ACSV o un algoritmo optimizador de flujo.

En el ACSV, se muestra que la lógica planteada es válida para el problema dado.

Además, todos estos algoritmos han sido creados con las siguientes características: escalabilidad, autonomía y distribuidos. Gracias a su capacidad de percibir el entorno, el agente se adapta el medio que lo rodea, evitando tener que reajustar el control cada vez que se hace un cambio en la micro-red. A fecha de hoy, los agentes son totalmente autónomos y no hace falta de intervención humana para su funcionamiento. Son distribuidos, esto quiere decir que cada agente realiza acciones locales sobre la micro-red. Gracias a la capacidad de comunicación entre agentes, el sistema es capaz de llegar a un equilibrio global mediante estas acciones locales. También, se ha evitado la creación de un agente que haga de árbitro más allá del ámbito de la micro-red. Consiguiendo que la micro-red se constituya como elemento unidad del sistema.

Se demuestra, por tanto, que los SMA son adecuados para la creación de sistemas de control distribuidos. Su gran poder reside en su capacidad de

comunicación y el de poder cooperar o negociar para la consecución de sus objetivos propios.

Por todo esto, se cree conveniente seguir el desarrollo del sistema de control para probar su eficacia sobre micro-redes reales.

7.2 Líneas futuras

En el algoritmo del cálculo del mínimo coste el algoritmo creado funciona perfectamente y con un tiempo de cómputo bastante reducido. Sin embargo, aún necesita de desarrollo para probarlo en una micro-red real. En concreto, los siguientes pasos a dar son los siguientes:

- El algoritmo tan solo funciona para situaciones normales de la micro-red y no en casos de emergencia. Se podría programar que cuando haya una situación de emergencia, el algoritmo reciba una señal para anular la compraventa de energía con otras micro-redes. De esta forma se aislaría de la red evitando que el fallo se propagara más allá del límite de la micro-red.
- Los agentes instalados en los generadores tan solo envían los datos de generación al AMC. En la siguiente versión de este agente se le podría dotar de inteligencia para que busque un beneficio económico para el generador. El agente podría analizar las ventas realizadas anteriormente para fijar el precio más adecuado para el siguiente periodo, siempre buscando una rentabilidad mínima para el generador.
- Se podría mejorar cómo cortar la carga en el agente instalado en el punto de demanda. Se pretende dotarle de inteligencia para que él decida que carga cortar dependiendo de algunas variables como la hora del día o la temperatura. Por ejemplo, en una tarde de invierno igual le interesa al usuario que, ante todo, no se corte la calefacción. Mientras que, si fuera de noche, igual le interesaba al mismo usuario que se cortara la calefacción en vez de la luz.

Una vez conseguidas estas ampliaciones y validar su correcto funcionamiento, el algoritmo estaría preparado para ser usado en una micro-red real.

El algoritmo del cálculo del flujo eléctrico (ACFE) está prácticamente acabado. Como se puede observar el algoritmo es bastante preciso, aunque presenta algunas limitaciones. La principal es que solo sirve para micro-redes de tipo lineal o radial. En caso de que hubiera una micro-red mallada este algoritmo sería incapaz de resolverlo. Por tanto, el siguiente paso a dar sería ampliarlo para que pueda resolver micro-redes malladas.

El algoritmo ACFE, es parte de otro más grande. Los resultados obtenidos sobre el flujo, luego serán enviados a un optimizador. Con esto se consigue el flujo óptimo evitando pérdidas innecesarias en la micro-red.

Sobre el último algoritmo presentado, el del control secundario de voltaje, aún necesita desarrollo. En esta versión, es el propio agente el que inyecta o absorbe la energía reactiva. En La próxima versión se espera que el agente controle el dispositivo para que sea este último el que controle la energía reactiva en el bus.

Además, se espera que el control sea inteligente y sepa que cantidad de energía reactiva necesita absorber o inyectar para solucionar el problema en tan solo una iteración.

Capítulo 8

Bibliografía

- [1] Matthias Wissner. "The smart grid – A saucerful of secrets?". 18 de Enero 2011. Elsevier. Julio 2011. <<http://www.journals.elsevier.com/applied-energy/>>
- [2] Peter Crossley, Agnes Bevizof. "Smart energy systems: Transitioning renewables onto the grid". Septiembre 2010. Elsevier. Julio 2011. <<http://www.journals.elsevier.com/applied-energy/>>
- [3] A. Dimeas, N. Hatziargyriou. "A Multi-Agent System for Microgrids". 2004. IEEE Xplore Digital Library. Julio 2011. <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/dynhome.jsp>>
- [4] A. Dimeas, N. Hatziargyriou. "Operation of a Multiagent Systemfor Microgrid Control". 1 de agosto de 2005. IEEE Xplore Digital Library. Julio 2011. <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/dynhome.jsp>>
- [5] T. Nagata, H. Sasaki. "A Multi-Agent Approach to Power System Restoration". 2002. IEEE Xplore Digital Library. Julio 2011. <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/dynhome.jsp>>
- [6] Philip Taylor, Stephen McArthur, Graham Ault et al. "INTEGRATING VOLTAGECONTROL AND POWER FLOW MANAGEMENT IN AURA-NMS". 2008. IEEE Xplore Digital Library. Julio 2011. <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/dynhome.jsp>>
- [7] Euan M. Davidson, Stephen D. J. McArthur, Michael. J. Dolan, et al. "Exploiting Intelligent Systems Techniques within an Autonomous Regional Active Network Management System". 2008. IEEE Xplore Digital Library. Julio 2011. <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/dynhome.jsp>>
- [8] Christian Rehtanz. Autonomous System and Intelligent Agents in Power System Control and Operation. Alemania: Springer. 2003.
- [9] Fabio Bellifemine, Giovanni Caire y Dominic Greenwood. Developing multi-agent systems with JADE. Liverpool: Wiley. 2004.
- [10] Prahba Kundur. Power system stability and control. USA: Springer. 1994
- [11] Ryszard Strzelecki, Gzregorz Benysek. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks. London: Springer. 2008
- [12] Jorge J. Gomez Sanz. *Introducción a la tecnología de agentes*. Campus virtual de la UCM. Disponible en pdf: <<https://cv2.sim.ucm.es/moodle/mod/resource/view.php?id=15089>>

