



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS GENÉRICOS
CONSISTENTES EN DIVERSAS FUENTES Y MÚLTIPLES
MODOS DE TRANSMISIÓN.

OPTIMIZACIÓN DEL USO DE LAS FUENTES CON CRITERIOS
DE SOSTENIBILIDAD

Rafael Jesús Valdivieso Sarabia



Tesis

Doctorales

www.eltallerdigital.com

UNIVERSIDAD de ALICANTE

Universidad de Alicante

Departamento de Tecnología Informática y Computación

TESIS DOCTORAL

MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS GENÉRICOS
CONSISTENTES EN DIVERSAS FUENTES
Y MÚLTIPLES MODOS DE TRANSMISIÓN.
OPTIMIZACIÓN DEL USO DE LAS FUENTES CON CRITERIOS
DE SOSTENIBILIDAD.

Autor:
RAFAEL JESÚS VALDIVIESO SARABIA

Dirigida por:
DR. JUAN MANUEL GARCÍA CHAMIZO

Alicante, noviembre de 2013

a Ana, mi contexto



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

*Hay suficiente en el mundo
para las necesidades del hombre,
pero no para su avaricia*

Mahatma Gandhi



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Agradecimientos

Es inevitable echar la vista atrás y agradecer a quienes han permitido, contribuido, apoyado y motivado este trabajo.

Juanma y *Javi*, por ilustrarme con su rigor, paciencia y dedicación infinita.

Mis padres, por inculcarme los principios y valores subyacentes a toda decisión.

Mi *hermana*, *cuñado* y *sobrinos*, por su apoyo y motivación incondicional. Sobre todo, mi ahijado, *Jesús*, cuya curiosidad natural e insaciable me ha permitido compartir con él las gráficas del capítulo sexto.

Ana, por sus palabras de aliento y calor.

Compañeros y *amigos* del departamento, por compartir ilusiones disfrazadas con café.

Amigos y *familiares*, cuyo simple trato influencia este trabajo.

Resumen

Esta investigación aborda el problema de la distribución eléctrica en sistemas genéricos compuestos por varias fuentes de energía (hidroeléctrica, eólica, solar, etc.), múltiples medios de transmisión (líneas de transmisión, medios de almacenamiento, convertidores, etc.) y varios centros de consumo (edificios, viviendas, lavadoras, portátiles, teléfonos móviles, etc.), concretamente, haciendo uso de criterios sostenibles que aprovechen las bondades de las fuentes de energía renovables. Los aspectos de universalidad y de escalabilidad requieren especial atención en los problemas de distribución eléctrica, precisamente, por su falta de linealidad inherente. De ahí la relevancia del recurso al rigor formal y a la coherencia metodológica para alcanzar propuestas compatibles con la condición fuertemente aplicada de los problemas de esta naturaleza.

La propuesta se concreta, por tanto, en una solución que, partiendo del modelado formal de los sistemas eléctricos, proporciona sucesivos niveles de verificación empírica, desde la simulación sobre prototipos de tecnología software hasta la potencial experimentación mediante prototipos electrónicos, los cuales tendrá sentido validar bajo demanda debido a su coste.

Específicamente, los objetivos planteados en la investigación son: proponer un modelo formal de sistema eléctrico capaz utilizarse sistemáticamente en la obtención de soluciones arquitecturales en problemas pertenecientes a diversos ámbitos, contextos o niveles de abstracción; especificar y diseñar una estrategia

de gestión eléctrica integrable en el modelo, que optimice la distribución de la electricidad en función de los requerimientos y que permita gestionar cargas con el objetivo de preservar el medio ambiente y garantizar la sostenibilidad energética mediante el fomento de fuentes de energía renovables; diseñar y desarrollar un prototipo de entorno de ayuda al diseño de redes y sistemas eléctricos que facilite la validación del modelo y las estrategias de gestión gracias a las ventajas de la inserción de una etapa de simulación previa a la de prototipado.

La revisión del estado del arte aborda las técnicas de distribución de electricidad, modelos de sistemas multiagente y las metodologías de desarrollo de sistemas multiagente.

A la hora de aplicar los sistemas de gestión de la distribución eléctrica, se distinguen diversos contextos: redes de transporte y distribución, barrios, edificios, viviendas, vehículos, robótica móvil, dispositivos electrónicos ubicados y portables. Los sistemas de gestión de la distribución eléctrica están diseñados y desarrollados de acuerdo a las características concretas del sistema a gestionar. Esto conlleva que las estrategias de gestión se definan de forma particular para cada caso y, generalmente, se caracterizan por la falta de dinamismo. Además, la falta de compatibilidad entre sistemas de gestión de la distribución a distintos niveles limita la coordinación entre ellos. La capacidad de cómputo es uno de los factores que gana relevancia en función de la talla del problema, ya que las alternativas de distribución crecen de forma exponencial con el número de nodos.

La utilización de sistemas multiagente tanto en la etapa de modelado como en la de desarrollo permite plasmar las características comunes en el modelo de sistema multiagente para la gestión de la distribución eléctrica que pueda ser empleado independientemente del contexto de aplicación. Los modelos de sistemas multiagente no permiten diseñar agentes recursivos, entendiendo agentes recursivos como aquellos que son capaces de contener a otro sistema multiagente. Existe una amplia diversidad de metodologías para el desarrollo de sistemas multiagente pero ninguna de ellas ha alcanzado un alto grado de utilización como para convertirse en un estándar de facto. Esto se debe, en parte, a la falta de una definición universal de agente o sistema multiagente, y que además se ve acentuado por los diversos tipos de arquitecturas de agentes, los frameworks para el desarrollo de sistemas multiagente y la gran variedad de contextos de aplicación que determinan la idoneidad de unas metodologías sobre otras.

La propuesta de solución del problema de la gestión de la distribución eléctrica en diversos contextos está en consonancia con el paradigma de arquitecturas dirigidas por modelos y hace uso de sistemas multiagente tanto para el modelado como para el desarrollo y la construcción de prototipos. Se ha propuesto un modelo formal de sistema multiagente recursivo y se ha particularizado para el framework JADE, dando como resultado una librería java, *fdSMADe*, que permite crear instancias de las clases de agentes definidos en el modelo y ejecutar dichos agentes sobre el framework JADE. Con el fin de facilitar el diseño de los sistemas multiagente a partir de él, se ha desarrollado, de forma independiente, el entorno de prototipado denominado *pSMADe*. Permite diseñar y configurar el sistema multiagente para el sistema eléctrico concreto a gestionar, estableciendo los criterios de optimización deseados. Gracias a la simulación tanto de la generación como del consumo, se puede evaluar la bondad de la distribución eléctrica obtenida y realizar los cambios pertinentes. El desacoplamiento entre modelo, framework de agentes y entorno de prototipado permite utilizar un único entorno de prototipado para crear de forma automatizada los sistemas multiagente para cada uno de los frameworks de agentes que den soporte al modelo de agentes. Para ellos, se requiere portar el modelo formal a cada uno de los frameworks que se quieran utilizar. En este trabajo únicamente se ha realizado con JADE.

Las clases de agentes que componen el modelo formal se pueden agrupar en aquellos que manipulan electricidad y los que proporcionan servicios. El subgrupo de agentes que manipulan electricidad está compuesto por: agente fuente de energía eléctrica, *F*, que representa a todos los agentes que únicamente son capaces de suministrar electricidad; agente centro de consumo de energía eléctrica, *C*, que representa a todos los agentes que requieren electricidad para realizar su cometido; clase agente transpondedor de energía, *T*, representa a todos los agentes que son capaces de recibir y/o suministrar, almacenar o transportar energía eléctrica, pudiendo llegar a alterar alguna de las magnitudes eléctricas. Por su parte, el subgrupo de agentes que proporcionan servicios está formado por: agente búsqueda de agentes, *BA*; agente interfaz de usuario, *IU*; agente de optimización global, *OG*; agente de simulación de potencia, *SP*; y agente de predicción meteorológica, *PM*.

La técnica propuesta para distribuir de forma optimizada la energía se diferencia de las soluciones ya existentes principalmente en que aúna las ventajas de la computación distribuida y centralizada. Además, es capaz de gestionar

cargas, con el fin de reducir el consumo energético de los agentes de tipo C que sean capaces de deshabilitar funcionalidades que no sean críticas. La optimización de la distribución eléctrica basada en el modelo de sistema multiagente se descompone en dos fases: local y global. La primera, totalmente distribuida, establece el intercambio de mensajes dando lugar al conjunto de interacciones que permiten elegir a los mejores agentes para proporcionar suministro eléctrico y el conjunto de interacciones que permiten gestionar la carga, solicitando que se reduzca el consumo ante potenciales situaciones críticas. En cambio, la fase de optimización global, que es centralizada, parte de la solución anterior e intenta mejorarla buscando caminos alternativos considerando el sistema completo. La optimización global se realiza de forma acotada en el tiempo, por lo que se buscan soluciones mejores mientras haya tiempo disponible.

La experimentación realizada ha permitido validar tanto el modelo como las estrategias de distribución eléctrica en dos casos de estudio bien diferenciados. Una red de distribución metropolitana y un computador portátil dotado de un cargador solar y batería. La elección de los escenarios antagónicos ha permitido comprobar la viabilidad de la propuesta para adaptarse a dichos contextos.

La aportación global de este trabajo es la generalidad del modelo formal de sistema eléctrico y de las estrategias de gestión parametrizadas que permiten obtener sistemas de gestión de la distribución particulares para un problema concreto. En consecuencia, esta investigación abre una línea metodológica e instrumental para la obtención de soluciones al problema de la distribución eléctrica a todos los niveles, desde las redes de alta energía, hasta el microabastecimiento que requieren los dispositivos "wearable", desde las sencillas redes con fuente única de suministro, hasta las configuraciones híbridas multifrecuenciales e incluso multimedia (coexistencia de transporte de energía con datos e información de control). Hasta el presente, el tratamiento del problema se ha llevado hasta el nivel de desarrollo precompetitivo, el cual se ha materializado en la solicitud de la patente "P201101361" cuyo título es "Sistema y método para la distribución y gestión de energía eléctrica"

Abstract

This research addresses the problem of electricity distribution on heterogeneous networks (subnets supporting different voltage), with several energy sources (hydropower, wind-power, sun-power, etc.), multiple transmission media (transmission lines, storage devices, converters) and various consumption centres (buildings, houses, washing machines, laptops, mobile phones), using sustainable criteria that exploit the benefits of renewable energy sources. The aspects of universality and scalability require special attention in electrical distribution problems precisely by its inherent nonlinearity. Hence the importance of formal correctness and methodological consistency to achieve proposals that is compatible with strongly practical nature of these problems.

Therefore, the solution is based on the formal modelling of the electrical systems, which provides empirical verification through successive ways, from simulation on software prototypes to potential experimentation with electronic prototypes, which will make sense to validate under market demand due to its cost.

Specifically, the research objectives are:

- Develop a formal model capable of representing components of electrical networks. The model should be general enough to be used routinely to solve problems that arise at different levels of abstraction. These solutions must address the problems related to power distribution between the constituent elements using its intrinsic characteristics.

- Specify and design power management strategies that belong to the model. The features of the strategies are: distributed, modular, autonomous and scalable. The aim is to make the best use of power distribution from sources to consumption centres depending on the requirements of the facility, users, generation capacity and consumption needs. The aim is to preserve the environment and ensure energy sustainability by promoting renewable energy sources.
- Design and develop a prototype design aid environment of networks and electrical systems, which makes easier the validation of the model and management strategies. The environment allows cyclic refinement process in order to feedback the prototype design. Also, the ability to simulate the electrical distribution over the model instance facilitates the economic and temporarily evaluation of the solution by taking advantage of inserting a simulation stage prior to prototyping.

The state of the art review addresses the electricity distribution techniques, multi-agent system models and methodologies for development of multi-agent systems.

Power management systems can be applied to several contexts: power grids, neighbourhoods, buildings, homes, vehicles, mobile robotics, electrical appliances and portable electronic devices. Power management systems are context-aware, so they are designed and developed according to the particular features of the system to handle. This means that management strategies are defined in a particular way for each case, usually characterized by a lack of dynamism to changes or impacts on the environment. Moreover, the lack of compatibility between management systems on different contexts limits the coordination among them. Computing performance is a relevant factor depending on size of the problem, since the distribution paths has an exponential growth due to the number of nodes.

The use of multi-agent systems applied in modelling and development stages allows determining common features on multi-agent system model for managing power distribution, which can be applied regardless of the application context. Existing agent models does not allow designing recursive agent, defining recursive agent like agents that can be composed by a multi-agent system, establishing different abstraction levels. There is a wide variety of methodologies to develop multi-agent systems, but none has achieved a high degree of utilization in order to

become a facto standard. This is due, in part, to the lack of a universal definition of agent or multi-agent system, and also is accentuated by some types of agent architectures, several development frameworks and a variety of application settings that determine the suitability of a particular methodology.

The proposed solution to the problem of electrical management is founded on the concepts proposed by the paradigm of model-driven architecture and uses multi-agent systems for modelling, development and prototyping. A formal model of recursive multi-agent system has been proposed and developed for the JADE framework like a Java library named *fdSMADe*. This library can be used for instantiating agent classes and agents deploying on JADE framework. In order to facilitate the design of multi-agent systems, it has been developed a prototype design aid environment, named *pSMADe*, independently from *fdSMADe*. It allows designing and configuring the multi-agent system, giving values to the parameters and establishing the optimization criteria. Once it is configured, maximum generation forecasts and power consumption can be simulated. Simulation results allow evaluating the solution given by the multi-agent system and changing the values of the parameters in order to improve the solution. Decoupling among the model, framework and prototyping environment allows the use of a single prototyping environment to create automated multi-agent systems for each multi-agent system framework integrated. It requires adapting the formal model to each framework will be integrated. This work was carried out with JADE framework.

The model is composed of several agent classes that can be classified in: electrical agents and providing services agents. The subset of agents that manipulates electricity is made by power source agents, *F*, which represents agents that are able to supply electricity; power consumption centre agents, *C*, which represents agents that require electricity to perform its duties; electricity transponder agents, *T*, which represents agents that are capable of receiving and supply power, being able to store or transport electricity or to alter any of the physical magnitudes of electricity. The subset of agents that provide services is made by: search agents, *BA*; user interface agents, *UI*; global optimization agents, *OG*; power simulation agents *SP*; and weather forecasting agents, *PM*.

The proposed technique to optimally distribute energy differs from existing solutions mainly in combining advantages of distributed and centralized computing. Moreover, it performs load management, in order to reduce energy consumption of the *C* agents, which are able of disabling non-critical

functionalities. The optimization of electrical distribution is decomposed into two phases: the local and global. The first, which is fully distributed, establishes the exchange of messages leading to the set of interactions for choosing the best agents to provide power and the set of interactions that allows load management. The load management interactions ask for reducing power consumption disabling some functions. Instead, the global optimization phase, which is centralized, starts with the solution given in the previous phase and tries to improve it, looking for alternative paths considering the complete system to improve the goodness of the solution. Global optimization is performed in time bounded, so it looks for better solutions while there is available time.

Experimentation has made it possible to validate both the model and power distribution strategies into two diverse case studies. A metropolitan grid and a laptop equipped with a solar charger and battery. The choice of antagonistic scenarios has revealed the feasibility of the proposal to adapt to these contexts.

The main contribution of this work is the generality of the formal model of electrical networks and parameterized management strategies, which can obtain a particular distribution management strategy for a specific problem. Therefore, this research opens a methodological and instrumental line for obtaining solutions to problem of power distribution at all levels, from electrical grids, to low power supply, which requires wearable devices, from the simple network with single power source to hybrid multi-frequency configurations and even multimedia (energy, data and control information). To date, the treatment of the problem has led to the level of pre-competitive development, which has resulted in the Spanish patent application "P201101361" entitled "System and method for the distribution and management of electrical energy."

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Contenido

Capítulo 1. Introducción.....	23
1. Motivación.....	25
1.1. Análisis de la evolución del consumo eléctrico.....	28
1.2. Sostenibilidad energética.....	30
2. Objetivos.....	47
3. Antecedentes.....	50
3.1. Redes inteligentes.....	50
3.2. Viviendas residenciales.....	62
3.3. Vehículos.....	66
3.4. Robótica móvil.....	68
3.5. Dispositivos electrónicos.....	70
4. Formulación del problema.....	74
4.1. Propuesta de solución.....	76
Referencias	85

**Capítulo 2. Metodología de Modelado y Prototipado
basado en Agentes 101**

1.	Agentes y sistemas multiagente	103
2.	Metodologías de modelado	107
2.1.	Comparativa entre metodologías.....	107
3.	Metodología funcionalidad- estructura-tecnología (FET).....	118
3.1.	Fase de análisis.....	119
3.2.	Fase de diseño.....	126
3.3.	Fase de implantación.....	132
3.4.	Resumen de la metodología FET	138
	Referencias	141

Capítulo 3. Modelado de Sistemas Eléctricos 147

1.	Introducción.....	149
2.	Modelo funcional.....	150
2.1.	Clases de agentes.....	150
2.2.	Roles	158
2.3.	Objetivos.....	162
3.	Modelo estructural.....	166
3.1.	Modelo de agente.....	166
3.2.	Particularización del modelo de agente para sistemas de distribución eléctrica.....	181
3.3.	Protocolos de interacción.....	209
	Referencias	217

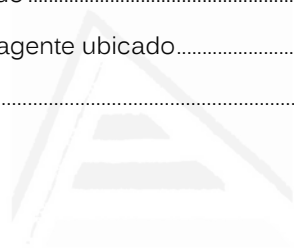
Capítulo 4. Gestión de la Distribución Eléctrica.....	221
1. Introducción	223
2. Fase de optimización local	227
2.1. Gestión de suministro	229
2.2. Gestión de carga	231
3. Fase de optimización global	235
4. Resumen	242
Referencias	245

Capítulo 5. Prototipado basado en el Modelo Tecnológico.....	247
1. Introducción	249
2. Modelo tecnológico	254
2.1. Plataforma JADE	254
2.2. Relaciones entre modelo estructural y JADE	257
2.3. Framework para el desarrollo de sistemas multiagente para la distribución eléctrica <i>fdSMADÉ</i>	259
3. Entorno de prototipado <i>pSMADÉ</i>	268
3.1. Descripción de <i>pSMADÉ</i>	269
3.2. Integración de <i>pSMADÉ</i> y <i>fdSMADÉ</i>	278
3.3. Simulación	282
3.4. Implantación	283
Referencias	285

Capítulo 6. Casos de Estudio	291
1. Introducción.....	293
2. Red de distribución metropolitana.....	297
2.1. Microgrid de una ciudad tipo.....	299
2.2. Arquitectura del sistema multiagente en el framework <i>pSMADÉ</i>	303
2.3. Capacidad de generación y requerimientos energéticos.....	311
2.4. Distribución eléctrica.....	314
3. Dispositivos electrónicos portables.....	326
3.1. Ordenador portátil.....	326
3.2. Arquitectura del sistema multiagente en el framework <i>pSMADÉ</i>	328
3.3. Capacidad de generación y requerimientos energéticos.....	337
3.4. Distribución eléctrica deshabilitando la gestión de carga.....	339
3.5. Distribución eléctrica con gestión de carga disparada al alcanzar el nivel de reserva mínima	343
3.6. Distribución eléctrica con gestión de carga disparada al superar la media de consumo.....	347
3.7. Comparativa entre las tres estrategias de distribución.....	351
Referencias	355

Capítulo 7. Conclusiones.....	357
1. Contributions.....	359
2. Future work	364

Listado de Figuras.....	365
Listado de Tablas	373
Anexo A Sistemas de Medición de Fasores	377
1. Introducción	379
2. Aplicaciones	381
Referencias	383
Anexo B Modelo Weyns-Holvoet.....	385
1. Introducción	387
2. Sistema dinámico	388
3. Modelo de agente ubicado	391
4. Modelo de sistema multiagente ubicado.....	394
Referencias	399



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Capítulo uno

Introducción

El capítulo presenta las motivaciones, tanto personales como profesionales, que han guiado el trabajo recogido en este documento, y los objetivos marcados. Seguidamente, se analiza el estado del arte relacionado con sistemas de gestión de la distribución eléctrica aplicados a distintas áreas, con el fin de identificar los aspectos comunes y susceptibles de mejora. El capítulo finaliza con una especificación formal del problema y con la propuesta de solución.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



1. Motivación

El inicio de un trabajo, comúnmente se tiende a relacionar con la primera tarea planificada o incluso con la propia planificación. En cambio, si reflexionamos durante unos instantes, seguramente, llegaremos a la conclusión de que el germen que lo propició se encuentra inmerso bajo las experiencias vividas a lo largo de los años.

Tal es el caso, que esta investigación probablemente tenga su razón de ser en un viaje realizado hace algunos años, más de los que me gustaría, a través de varias ciudades italianas. A medida que el viaje avanzaba, me iba impregnando de los diferentes estilos artísticos y arquitectónicos a los que pertenecían cada una de las obras y monumentos visitados. Cada uno de ellos está determinado por los conocimientos, técnicas y situación social de sus respectivas épocas, no obstante se pueden obviar dichos factores temporales con el fin de establecer un dominio común que permita compararlos sistemáticamente. Especialmente me impactó el antagonismo entre el estilo clásico romano y la corriente renacentista, generosamente apreciable en Florencia. El estilo romano se caracteriza por el pragmatismo llevado al límite, muestra de ello son las grandes construcciones de arquitectura civil: acueductos, puentes, carreteras, templos, etc. evitando a toda costa los detalles superfluos e innecesarios para su cometido funcional. Es por tanto, envidiable la capacidad de planificación, organización y gestión de recursos llevada a cabo para la construcción y perduración de las obras a lo largo del tiempo. El renacimiento, en cambio, desprende ese aire de opulencia mediante la búsqueda del ideal clásico, inspirado tanto en la naturaleza como en el propio ser humano, la incorporación de perspectiva y el uso de proporciones asociadas a cánones de belleza -proporción aurea¹ o divina (Dunlap, 1997)-. El estilo renacentista favorece la búsqueda de la perfección estética en las obras en contra de la usabilidad, que queda postergada a un plano secundario. La magnitud de las obras renacentistas era tal que necesitaban grandes cantidades de recursos, tanto económicos como temporales, para acometerlas. El modelo de gestión de

¹ Número irracional representado por ϕ cuyo valor es $(1 + \sqrt{5})/2$. Dado un segmento de línea dividido en dos segmentos, uno de mayor tamaño que el otro. Se define como la relación entre la longitud total del segmento y la del segmento de mayor tamaño que es a su vez igual a la relación entre el mayor y el menor segmento.



recursos asociado al renacimiento, que persigue la maximización de la belleza sin importar los recursos necesarios para alcanzar la perfección, contrasta con el modelo de gestión clásico, caracterizado por maximizar la usabilidad invirtiendo la cantidad mínima o razonable de recursos. Este último modelo induce sutilmente el concepto de sostenibilidad asociándolo a una gestión óptima de recursos en contra del modelo renacentista, que deja de lado los criterios sostenibles siendo únicamente las ciudades-estado económicamente más poderosas las principales exponentes de dicho estilo artístico.

La sostenibilidad asociada a la gestión adecuada de recursos no siempre se ha tenido en cuenta como un criterio de diseño, ya que en función de los aspectos socio-económicos, culturales y técnicos de cada época han primado unos criterios sobre otros. La popularización de la producción en serie, que se llevó a cabo durante la revolución industrial, es una muestra de optimización, en la que se aumenta la producción disminuyendo los costes temporales y económicos de los procesos productivos industriales. Otro factor ligado a la sostenibilidad, es la racionalización del consumo de recursos en general. Las personas mayoritariamente consumían en función de sus necesidades, aunque a medida que dichas personas han ido aumentando su poder adquisitivo y gracias, en parte, a las campañas de marketing, el consumo ha pasado a depender de la capacidad económica, sin tener en cuenta las necesidades reales de dichos recursos. Esta tendencia consumista basada en la concepción de que los recursos eran ilimitados sugiere la ausencia de criterios sostenibles. A medida que las sociedades han ido adquiriendo conciencia de que los recursos son limitados, el concepto de sostenibilidad ha adquirido cierta relevancia, especialmente en lo que se refiere a sostenibilidad energética. Este modelo de desarrollo representa la idea que subyace y motiva esta investigación, que ha sido soportada económicamente por una beca y contrato de formación de profesorado universitario (FPU), destinados a la formación de doctores en temáticas relacionadas con el uso racional de la energía, las energías renovables y la protección del medio ambiente, que he disfrutado. La beca marca una serie de líneas de actuación, entre ellas, la de "Ahorro y Eficiencia Energética" es la que circunscribe este trabajo, concretamente los aspectos de "Gestión de la Demanda" y "Control y Estrategias de Reducción del Consumo Final".

A lo largo de los años, he ido recibiendo la formación que me ha proporcionado unas bases sobre las que sustentar los nuevos conocimientos que he ido adquiriendo. Entre los hitos más significativos, destacar mi colaboración



con el grupo de Domótica y Ambientes Inteligentes (DAI) del departamento de Tecnología Informática y Computación (DTIC) de la Universidad de Alicante (UA). Dicha colaboración se materializó a raíz de la asignatura “Sistemas Informáticos” del último año de Ingeniería en Informática, que fue dirigida por el Catedrático de Arquitectura y Tecnología de Computadores, y codirector de esta investigación, Juan Manuel García Chamizo. En ella, comencé a vislumbrar tanto el Método Científico como el significado de Investigación, Desarrollo e Innovación. Conceptos que he ido asimilando de forma paulatina a medida que mi vinculación con el grupo DAI se ha ido consolidando a través de las diversas becas de investigación que he disfrutado. Durante esta etapa de formación, he tenido la oportunidad de colaborar en diversos proyectos. Algunos de ellos en la línea de este trabajo y otros complementarios, en los que he aplicado el método científico y técnicas de inteligencia artificial en áreas de conocimiento adyacentes. El trabajo realizado en esta investigación se ha visto influenciado de forma indirecta por la participación en los siguientes proyectos complementarios:

- Sistemas de vigilancia visual para la identificación y caracterización de comportamientos anómalos (GV/2011/034).
- Sistema de visión para la monitorización de la actividad de la vida diaria en el hogar (TIN2010-20510-C04-02).
- Sistema de vigilancia visual para la identificación y caracterización de comportamientos anómalos en entornos restringidos bajo restricciones temporales (GRE09-16).
- Sistema de visión para la monitorización de actividades de las personas en el hogar (TIN2009-14406-C05-02).
- Soporte software para la provisión de servicios derivados de la localización de recursos móviles en escenarios no estructurados y tecnologías de acceso inalámbricas heterogéneas (GVPRE/2008/125).

En cambio, la participación en proyectos de investigación directamente relacionados con este trabajo me ha permitido profundizar en aspectos concretos. La colaboración en el proyecto “Especificación de desarrollo tecnológico de un sistema integral para el control y la monitorización del sistema térmico de la vivienda” (INSTALACIONESRIBERA2-09I) me ha permitido desarrollar un sistema de control y monitorización de la instalación de suelo radiante basado en autómatas programables. El algoritmo de control ha sido implementado como un sistema experto en gestionar la utilización de las distintas fuentes de energía, placas solar-térmica y bomba de calor reversible agua-agua, con el fin de



minimizar el consumo energético (Valdivieso-Sarabia et al., 2010). La línea de investigación referente a la monitorización y control de diversas fuentes de energía renovables ha sido posible gracias a la participación en el proyecto “Diseño y desarrollo de vivienda modelo automatizada como laboratorio/espacio demostrativo de innovación” (FEMPA1-09T) y a su continuación “Ampliación de metallic-hogar digital con la incorporación de nuevas fuentes de captación de energía y tecnologías para la vida” (INNOMETALIA1-10I). En dichos proyectos he abordado, entre otras tareas, la instalación, medición y monitorización de las distintas fuentes de energía, placas fotovoltaicas, aerogenerador, conexión a red eléctrica y baterías instaladas en una vivienda-laboratorio tipo de unos 55m². Las mediciones realizadas en un contexto real me han permitido profundizar en el conocimiento de los consumos y de extrapolar dichos consumos mediante la elaboración del modelo correspondiente.

1.1. Análisis de la evolución del consumo eléctrico

El consumo energético a nivel global ha ido aumentando de forma progresiva. (White, 2006) establece una relación directamente proporcional entre el nivel de desarrollo/bienestar de las sociedades y su consumo energético.

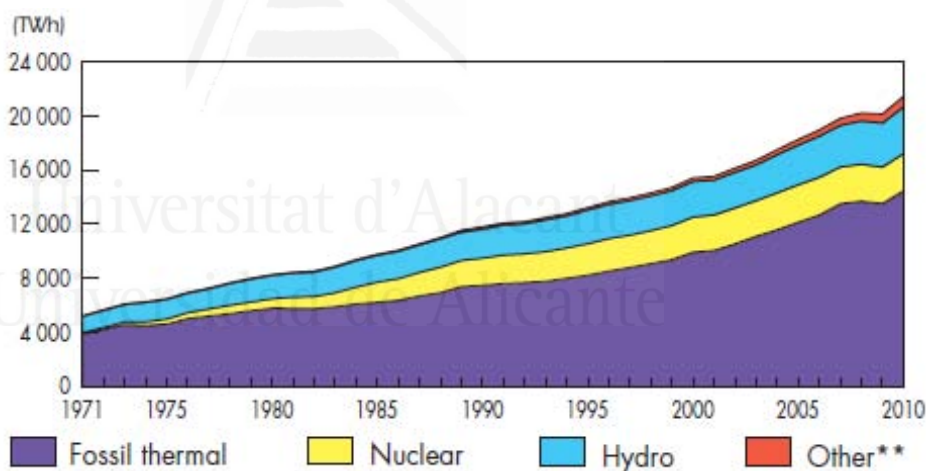


Figura 1.1. Evolución de la generación eléctrica mundial desde 1971 hasta 2010 en función de tipos de fuentes energéticas(IEA, 2012)



La evolución de la generación de electricidad mundial en función de los tipos de fuentes de energía desde 1971 hasta 2010 se puede observar en la figura 1.1 y figura 1.2 (IEA, 2012). La categoría de “otras” fuentes de energía incluyen la fotovoltaica, geotérmica, termosolar, eólica, biocombustibles, desechos orgánicos, y aprovechamiento de calor. En dichas figuras se aprecia el aumento significativo de la electricidad generada, concretamente un 329%, durante dicho periodo. La evolución del consumo eléctrico muestra una tendencia lineal ascendente, con la excepción del año 2009, en el que se aprecia un descenso significativo a consecuencia de la coyuntura económica que ha tenido repercusión a nivel mundial. Por lo tanto, el desarrollo y bienestar experimentado por las sociedades en general durante las 4 últimas décadas constata la relación descrita por (White, 2006). En el caso de que esta relación continúe siendo válida, llegará un momento en que los requerimientos energéticos mundiales sean insostenibles, por lo que claramente se evidencia la necesidad de cambios sustanciales a todos los niveles.

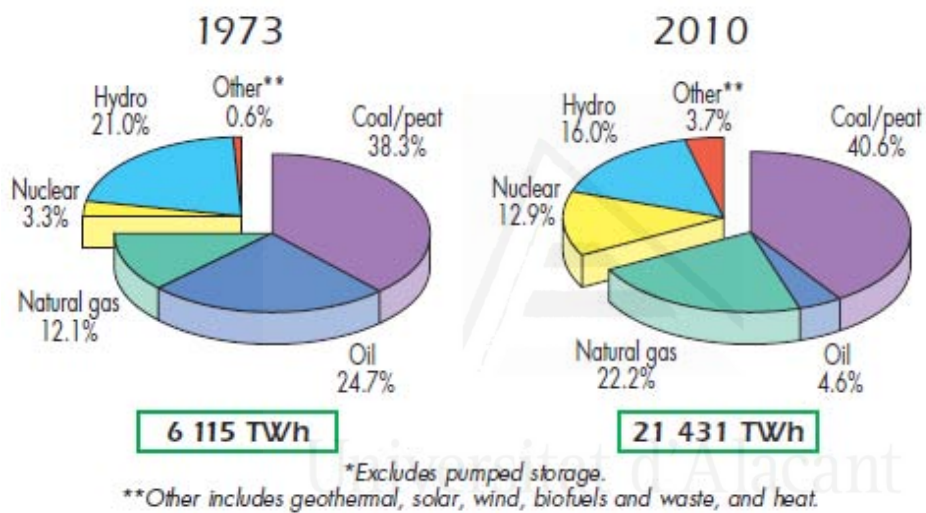


Figura 1.2 Comparativa de porcentajes de utilización de fuentes de energía entre 1973 y 2010
Sostenibilidad energética (IEA, 2012)

La figura 1.2 muestra la utilización de las diversas fuentes energéticas en 1973 y en 2010. Se puede observar como en 1973 las 2 principales fuentes energéticas para producir electricidad eran: el carbón/turba y petróleo (63%) y la utilización prácticamente nula de fuentes de energía renovables (0.6%). En 2010, el carbón/turba continúa siendo la principal fuente, aunque se aprecia un importante



descenso de utilización de petróleo (4.6%) a favor del gas (22.2%) y de la energía nuclear (12.9%). El uso de las renovables se ha incrementado (3.7%), aunque todavía representa un porcentaje bajo en comparación con las no renovables. La evolución del uso de las distintas fuentes de energía a lo largo de dicho periodo enfatiza la ausencia de criterios sostenibles y pone de manifiesto la gran dependencia de fuentes de energía no renovables que repercuten negativamente sobre el medio ambiente. Esta tendencia se está invirtiendo en los últimos años gracias a la difusión mediática de las bondades del desarrollo sostenible, lo que ha permitido que las sociedades estén constatando la necesidad de utilizar estrategias que permitan un desarrollo energético sostenible a lo largo del tiempo.

1.2. Sostenibilidad energética

El término sostenibilidad, por sí solo, únicamente hace referencia a la capacidad de un proceso de mantenerse por sí mismo a lo largo del tiempo, por lo tanto al hablar de sostenibilidad es aconsejable indicar el dominio del proceso sobre el que hace referencia. (Brundtland and Khalid, 1987) define desarrollo sostenible como “satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades del futuro para atender las propias necesidades”, además relaciona aspectos sociales, económicos y medioambientales de forma que en las situaciones en las que se satisfacen estos tres requerimientos se puede hablar de desarrollo sostenible (Goodland and Daly, 1996).

Social	Económico	Medioambiental
Mejora del bienestar de la sociedad	Viabilidad económica de los procesos asociados a la manipulación de la energía	Conservación del entorno natural
Uso racional y responsable de la energía		Preservación de las materias primas

Tabla 1.1 Requerimientos para alcanzar el desarrollo sostenible energético

Situando el dominio del problema en el sector energético, podemos definir la sostenibilidad energética como: “satisfacer las necesidades energéticas de las



generaciones presentes sin comprometer las posibilidades del futuro para atender las propias necesidades de energía". La tabla 1.1 muestra los principales requerimientos para alcanzar el desarrollo sostenible. Dicha tabla alberga factores sociales, económicos y medioambientales. El factor social se entiende como la mejora del bienestar y la concienciación ciudadana para el uso racional y responsable. El factor económico se refiere a la rentabilidad económica de los procesos asociados a la obtención, transformación, almacenamiento, distribución y consumo. Y el factor medioambiental hace alusión a la conservación del medio ambiente, ya sea mediante la preservación de las materias primas, el balance de emisiones de CO₂ neutro (Körner, 2003) y otras políticas.

Las sociedades modernas tienen ante sí el reto de alcanzar el desarrollo energético sostenible. Para conseguir este objetivo tan ambicioso, se han realizado varios acuerdos, convenciones y políticas globales. En 1992, se creó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, bajo el amparo de la Organización de las Naciones Unidas donde representantes de todos los países asociados se reúnen para hacer frente a los problemas asociados al cambio climático. Dicha convención tiene una periodicidad anual y entre ellas destacar la cumbre celebrada en 1997 en Kyoto. Se planteaba el objetivo de disminuir las emisiones de gases² que producen el efecto invernadero y para ello se aprobó el protocolo de Kyoto (Organización Naciones Unidas, 1997), donde los países a favor de esta medida se comprometieron a reducir sus respectivas emisiones. A lo largo de estos años cada nación ha tenido la libertad tanto de ratificar como de cumplir con dicho acuerdo. El protocolo de Kyoto se ratificó en la convención realizada en el año 2009 por la mayor parte de las naciones a excepción de uno de los mayores productores de este tipo de gases, Estados Unidos de América, (Organización Naciones Unidas, 2009). En 2012, se ratificó un segundo periodo de vigencia del Protocolo de Kyoto desde 2013 hasta 2020, aunque los países con mayor peso como Estados Unidos de América, Rusia, Japón y Canadá rechazaron la propuesta.

Paralelamente, los líderes del G8 trataron los retos que plantea el cambio climático: "garantizar una energía limpia y un desarrollo sostenible" en la cumbre celebrada en Gleneagles en el año 2005. La tabla 1.2 recoge el plan de acción elaborado con la participación por la Agencia Internacional de la Energía durante

² *dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆).*



la cumbre. Dicho plan de acción se centra en seis ámbitos generales (IEA, 2005): estrategias y escenarios de energía alternativos; eficiencia energética en los edificios, los electrodomésticos, el transporte y la industria; combustibles fósiles más limpios; captura y almacenamiento del carbono; energías renovables y mayor cooperación internacional. La diversidad de ámbitos que presenta en el plan de acción anterior muestra que no existe una única línea de acción en la que se debe avanzar en profundidad, sino que se debe de avanzar en cada una de ellas razonablemente para que de forma conjunta se consigan los objetivos marcados. Los ámbitos generales definidos en la cumbre de Gleneagles, están orientados a evitar el cambio climático, por lo que por sí solos no tienen la potencia suficiente para alcanzar el desarrollo energético sostenible. Con dichos objetivos en mente, es pertinente identificar los retos o desafíos que se deben mejorar para alcanzar la sostenibilidad energética.

Ámbitos

Estrategias y escenarios de energía alternativos
Eficiencia energética en los edificios, los electrodomésticos, el transporte y la industria
Combustibles fósiles más limpios
Captura y almacenamiento del carbono
Energías renovables
Mayor cooperación internacional

Tabla 1.2 Ámbitos generales del plan de acción definido en la cumbre de Gleneagles

El proceso llevado a cabo para la deducción de los retos se basa en partir de un conjunto finito de elementos, donde cada uno representa un reto todavía desconocido. La siguiente acción es definir relaciones de equivalencia para obtener subconjuntos del inicial, y así sucesivamente hasta que los subconjuntos resultantes sean suficientemente sencillos como para identificar cada uno de los retos de forma ordenada y sistemática. En el caso de que los subconjuntos sean



disjuntos entre sí, se obtiene como resultado un árbol, y en el caso contrario un grafo.

Id	Acción	Reto
R1	Generación	Agotamiento de materias primas
R2	Generación	Contaminación del medio ambiente
R3	Consumo	Eficiencia energética de aparatos
R4	Consumo	Distribución temporal del consumo energético irregular
R5	Consumo	Consumos innecesarios de energía
R6	Manipulación	Almacenamiento de energía
R7	Manipulación	Transporte de energía
R8	Manipulación	Transformación de energía
R9	Manipulación	Distribución energética

Tabla 1.3 Retos identificados para alcanzar la sostenibilidad energética

Partiendo del conjunto de retos, se establece una relación de equivalencia basada en las acciones que se pueden realizar sobre la energía, obteniendo como resultado tres clases de equivalencia: Generación, Manipulación y Consumo. Asociados a la generación se identifican el agotamiento de las materias primas utilizadas como combustibles y la contaminación del medio ambiente como consecuencia de la obtención de energía. El subconjunto de retos asociados al consumo está formado por: el consumo innecesario e irracional de energía que presentan las sociedades, por ejemplo cuando se dejan los aparatos eléctricos en *standby*, o encendidos mientras no se utilizan; la distribución temporal del consumo energético irregular a lo largo del tiempo determina que existen franjas horarias que requieren mayor cantidad de energía que otras; y la cantidad de energía que necesitan los aparatos eléctricos y/o electrónicos para desempeñar sus funcionalidades, ya que la tecnología avanza hacia aparatos energéticamente



más eficientes. Por último, dentro del subconjunto de retos asociados a la manipulación de energía se dan: el almacenamiento, baterías, supercondensadores, volantes de inercia,...; el transporte desde el emplazamiento donde se genera hasta donde se consume; la transformación de la electricidad AC/DC, DC/AC o a otros niveles de tensión; y la gestión de la distribución eléctrica en grandes redes eléctricas en las que se suele tener en cuenta principalmente criterios económicos. La tabla 1.3 resume el resultado de aplicar dicho método para la identificación de los retos o desafíos que deben ser mejorados para alcanzar la sostenibilidad energética. La propia naturaleza de los retos identificados hace conveniente analizar detalladamente cada uno de ellos.

1.2.1. Agotamiento de materias primas

Las técnicas tradicionales de obtención de energía requieren la utilización de diversas materias primas, principalmente combustibles fósiles. El agotamiento de los recursos como el petróleo, carbón, gas natural, etc. no se debe entenderse en sentido literal, sino que debemos entenderlo como que llegará un momento en el que no será energéticamente rentable. La rentabilidad de la extracción de los recursos energéticos dependerá de la cantidad de energía necesaria para su extracción. No será energéticamente rentable la extracción de recursos energéticos cuando su extracción necesite una cantidad de energía igual o mayor a la obtenida.

(EUROSTAT, 2012) categoriza la producción eléctrica de la Unión Europea, distinguiendo entre centrales térmicas convencionales, centrales nucleares, centrales hidroeléctricas, campos eólicos, y otros, donde se incluye la generación fotovoltaica. La figura 1.3 muestra el porcentaje de uso de cada una de ellas en la Unión Europea de los 27 países durante 2012. Cabe destacar que únicamente un 21% de la electricidad que se utilizó fue renovable. Aunque este porcentaje ha aumentado en los últimos años, todavía se tiene una alta dependencia del uso de combustibles fósiles y fuentes de energía no renovables. La utilización del 79% restante está determinada en orden decreciente por las centrales térmicas convencionales y nucleares.

Una vez mostrado el panorama actual de consumo energético en Europa y el alto grado de utilización de las distintas fuentes de energía es menester plantearse la idoneidad de cada una de las fuentes. La energía nuclear es una fuente de



energía no renovable y contaminante, ya que los residuos resultantes de su utilización presentan un volumen reducido pero son altamente dañinos para la vida durante largos periodos de tiempo. El principal problema derivado de su utilización es el almacenamiento de los residuos con garantías de aislamiento así como la seguridad en las centrales. Por su parte, la energía que se obtiene a partir de los combustibles fósiles como carbón, gas natural y petróleo presentan principalmente dos problemas: son limitados y producen sustancias contaminantes. Llegará un momento en que no se podrán extraer debido a que no será energéticamente rentable.

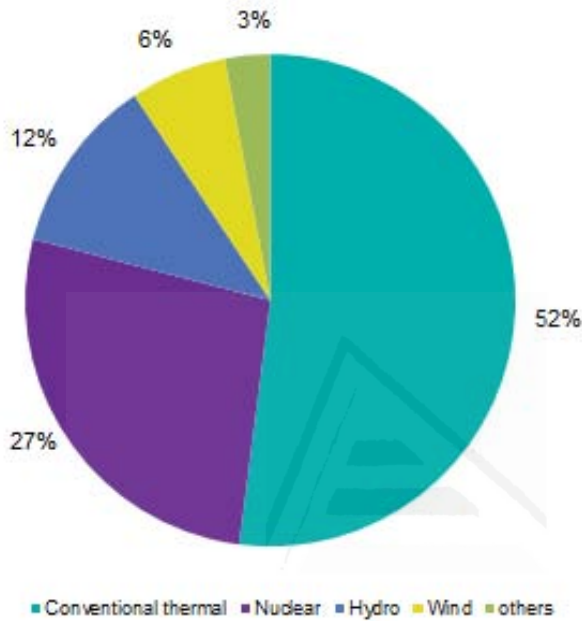


Figura 1.3 Producción eléctrica en EU27 en base a la fuente generadora en 2012 (EUROSTAT, 2012)

Según (BP, 2013) las reservas probadas de petróleo mundiales en 2012 se estiman en unos 1668,9 miles de millones de barriles, lo que permite una producción actual constante de hasta 52,9 años. El citado número de años es irreal, aunque intuitivo, ya que supone un consumo constante durante todo ese periodo. El consumo energético tiende a aumentar con el tiempo, a pesar de las mejoras en eficiencia energética, principalmente debido a los grandes países en vías de desarrollo, y al aumento de la población mundial. Por lo tanto, el número



real de años resulta ser menor de los 52,9 obtenidos a partir del ratio reservas/producción. Por otro lado, tal y como se puede observar en la figura 1.4, las mayores reservas se encuentran en Oriente Medio y el continente Americano, lo que propicia la dependencia energética del resto de países. Estos factores evidencian la necesidad de basar las sociedades actuales en otras fuentes de energía alternativas.

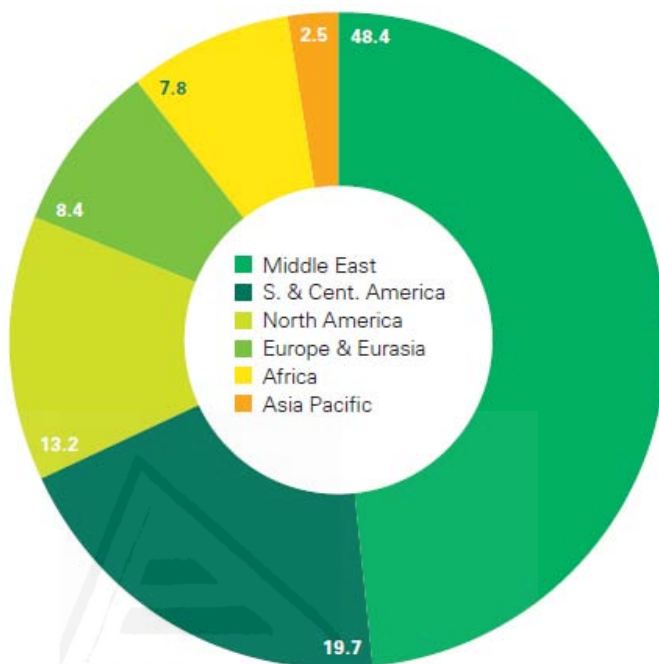


Figura 1.4 Distribución de las reservas mundiales de petróleo en 2012 (BP, 2013)

1.2.2. Contaminación del medioambiente

La utilización de combustibles tanto fósiles como nucleares para la obtención de energía, concretamente electricidad, ha repercutido directa y negativamente sobre el medio ambiente. El cambio climático se debe en parte a los gases del efecto invernadero; el adelgazamiento de la capa de ozono, por lo que algunas zonas del planeta se encuentran más expuestas a las radiaciones pertenecientes al espectro ultravioleta e infrarrojo; y lluvia ácida, como resultado de la combustión de combustibles fósiles, que hace viable la reacción química que origina ácido



nitrógeno y sulfúrico que se precipitan sobre la tierra al llover (Dincer and Rosen, 2007).

La evolución de las emisiones de efecto invernadero en la Unión Europea durante el periodo comprendido entre 1990 y 2011 es mostrada en la figura 1.5 (DG CLIMA, 2013). Dicha evolución es comparada con los objetivos marcados en el Protocolo de Kyoto para 2008-2012. Se puede observar la reducción de las emisiones en la Unión Europea conforme a los objetivos marcados. Este hecho muestra la tendencia decreciente, aunque, en parte, se deba a la coyuntura económica en Europa durante dicho periodo. Aún así, es conveniente intensificar los esfuerzos con el objetivo de reducir en la medida de lo posible dichas emisiones.

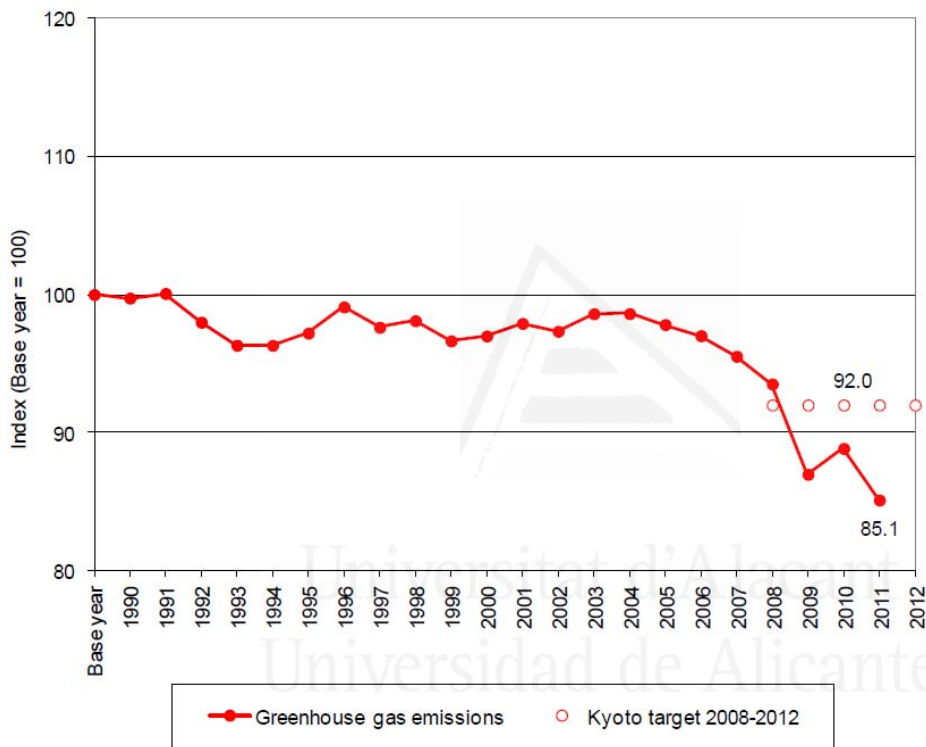


Figura 1.5 Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los países pertenecientes a Europa-15 comparadas con los objetivos para 2008-2012 (DG CLIMA, 2013)



1.2.3. Eficiencia energética

Las sociedades desarrolladas utilizan a diario multitud de aparatos o dispositivos que requieren electricidad para proporcionar sus servicios, lo que ha repercutido en un aumento del consumo eléctrico. La electricidad suministrada durante el periodo comprendido entre 2003 y 2012 en la Unión Europea de los 27 países es mostrada por la figura 1.6 (EUROSTAT, 2012). Se aprecia una creciente demanda hasta 2008. En 2009, aparece un punto de inflexión con una notable reducción del consumo. En el periodo 2010-2012, aumenta respecto a 2009, pero se establece una tendencia de reducción de consumo. Dicha reducción de consumo, tan drástica, efectuada a partir de 2009, se debe, principalmente, a la coyuntura económica de la zona Euro. Sin tener en cuenta este periodo, se observa que el consumo eléctrico aumenta. Entre la gran cantidad de factores socioeconómicos que intervienen en el consumo energético, se procede a analizar la eficiencia energética.

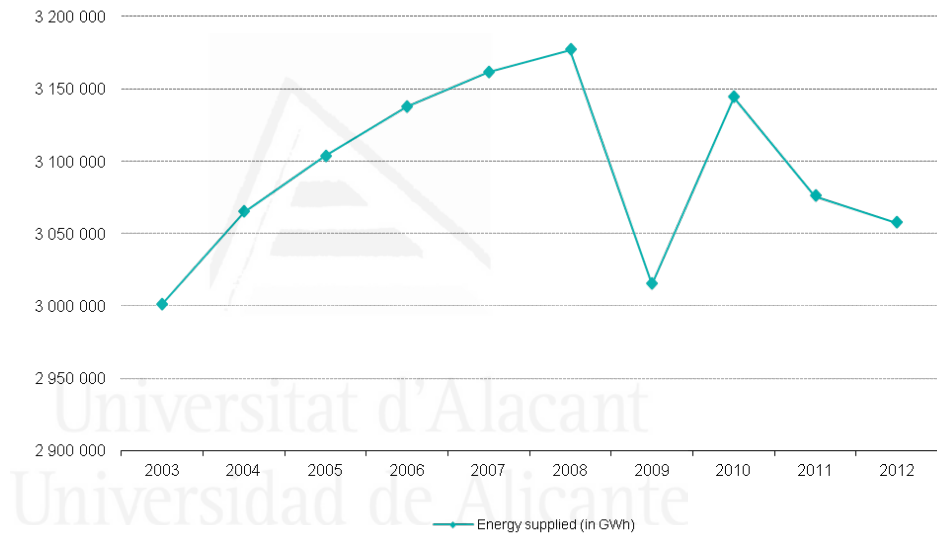


Figura 1.6 Evolución del consumo eléctrico desde 2003 hasta 2012 (EUROSTAT, 2012)

Cada vez se utiliza un mayor número de dispositivos durante nuestra vida cotidiana, que van incorporando nuevas y más potentes funcionalidades. A su vez, los fabricantes diseñan productos de bajo consumo y/o que permiten ahorrar energía. Los términos de bajo consumo o ahorro energético se suelen usar



alegremente aunque no sean suficientemente claros, ya que por sí solos no presentan una información útil. Únicamente hacen referencia al consumo energético sin tener en cuenta otros factores, como pueden ser las funcionalidades ofrecidas, o simplemente se cuantifica el ahorro energético sin especificar respecto a quien, ni las condiciones utilizadas para evaluar dicho ahorro. Existen términos más propicios para evaluar el consumo energético entre diversos aparatos, como la eficiencia energética, definida como el cociente entre los servicios ofrecidos y la energía requerida (Patterson, 1996), o su inverso, denominado indicador de consumo definido como el consumo de energía por unidad, servicio o producto. El hecho de que cada aparato proporcione diferentes servicios o funcionalidades hace que se utilice arbitrariamente el término de eficiencia energética en función de la naturaleza del aparato. (Patterson, 1996) enumera cuatro familias principales de indicadores:

- Termodinámicos basados en la leyes de la termodinámica y que establecen ratios entre la suma de la energía útil de la salida y entrada al proceso.
- Físicos-termodinámicos que relacionan unidades físicas obtenidas con la energía requerida para su procesamiento.
- Económicos-termodinámicos que relacionan el precio de mercado de los productos obtenidos y la energía requerida para manufacturarlos.
- Económicos que relacionan el precio en el mercado de los productos y el coste económico de la energía necesaria para su obtención.

La utilización de diversos factores se puede ver en los siguientes ejemplos. Los vehículos suelen utilizar el indicador de consumo definido como los litros de combustible que necesitan para desplazarse a una velocidad constante de 100 km/h, en cambio para luminarias se define la eficiencia energética como el cociente entre el producto de la superficie iluminada e iluminancia media y la potencia requerida.

A medida que nos encontramos con productos que ofrecen una gran cantidad de servicios heterogéneos se vuelve más complejo obtener indicadores de la eficiencia energética realistas, ya que en el fondo es el usuario el que determina su utilización a lo largo del tiempo. Se han de tener en cuenta factores subjetivos a cada uno, porque si el usuario mantiene un aparato siempre en marcha, aunque se tenga una eficiencia energética extraordinaria, a lo largo del tiempo el consumo total puede ser superior a otro energéticamente menos eficiente utilizado por un usuario durante menos tiempo. En cualquier caso,



aunque la eficiencia energética, por sí sola no sea condición suficiente, presenta una especial relevancia, debido a que es necesaria para reducir el consumo energético y, además, permite establecer relaciones de orden entre diversos aparatos de la misma familia.

1.2.4. Consumo energético innecesario

Existen multitud de ocasiones en que los aparatos eléctricos están consumiendo energía y no están proporcionando ningún servicio o el servicio no está siendo disfrutado. Un ejemplo de ello es lo que se denomina consumo en *standby* de los electrodomésticos de una vivienda. Según (Gram-Hanssen, 2010) el consumo en *standby* de una vivienda supone el 10% del total consumido. Otra situación puede ser cuando la televisión está encendida y no hay ninguna persona frente a ella. Este tipo de consumos eléctricos se pueden englobar en lo que se puede denominar consumos innecesarios, debido a que no producen ningún beneficio y representan un gasto energético inútil. Los responsables de este tipo de situaciones son, en la mayoría de casos, los propios usuarios, ya que o bien no son conscientes del consumo energético o no les importa que se produzcan este tipo de situaciones, porque económicamente se lo pueden permitir. El consumo innecesario depende de los hábitos de los usuarios, lo que indica la idoneidad de concienciar y/o ayudar a los usuarios a evitar los consumos innecesarios.

1.2.5. Distribución temporal del consumo energético irregular

Este aspecto, al igual que el anterior, también está condicionado por los hábitos de uso de los propios usuarios. El consumo energético muestra una distribución temporal particular a dicho usuario. Se puede obtener un patrón de consumo energético por usuarios pertenecientes a un determinado perfil, por lo que, de esta forma, se puede obtener una predicción de consumo energético.

El principal problema derivado de esta situación se da al integrar a todos los consumidores de electricidad. Las consecuencias de esta integración se dan por partida doble. En primer lugar, existen determinadas franjas horarias con mayores requerimientos energéticos que otras, lo que repercute en el coste económico. En



segundo lugar, la infraestructura energética ha de ser capaz de soportar los picos de carga en un determinado momento, lo que indica que la infraestructura está parcialmente infrautilizada. Esta situación se puede observar en la figura 1.7 (Red Eléctrica de España, 2013), que representa el patrón de consumo eléctrico en España en los días de máxima demanda horaria de electricidad durante el periodo comprendido entre 2008 y 2012.

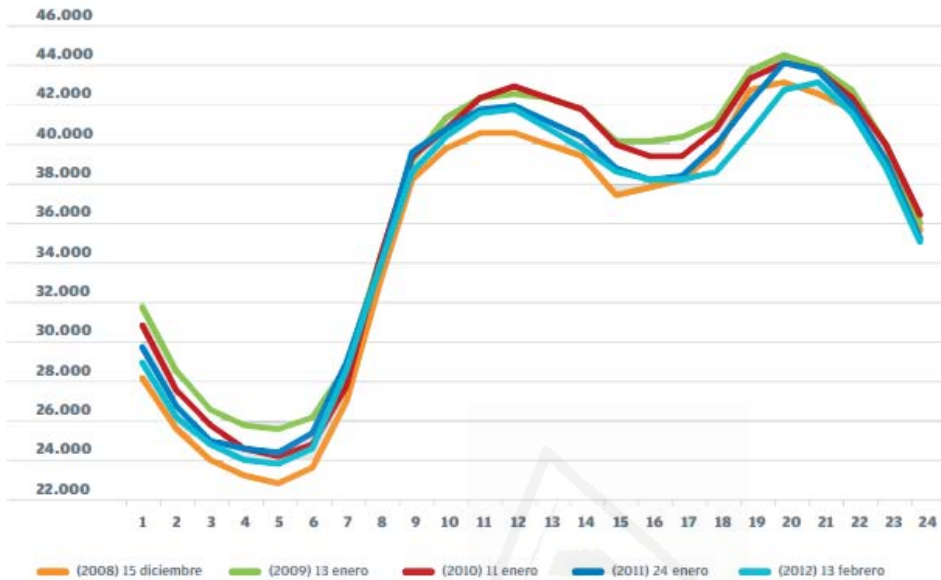


Figura 1.7 Comparativa de las curvas de carga (MWh) de los días de máxima demanda horaria durante 2008-2012 (Red Eléctrica de España, 2013)

1.2.6. Transporte, distribución, transformación y almacenamiento

La importancia del transporte, distribución, transformación y almacenamiento de energía depende del contexto en el que esté situado el sistema energético objeto de estudio, por lo tanto cada una de estas acciones tendrán un diferente grado de incidencia sobre el comportamiento del sistema en función del tipo de contexto.

La utilización de cada una de estas acciones se debe a la naturaleza distribuida tanto de la generación como del consumo de electricidad, por lo tanto



surge la necesidad de transportar energía desde donde se obtiene hasta donde se consume. Este supuesto es válido en mayor o menor medida para todos los contextos, aunque sugiere el contexto de redes eléctricas de gran envergadura interconectadas entre sí.

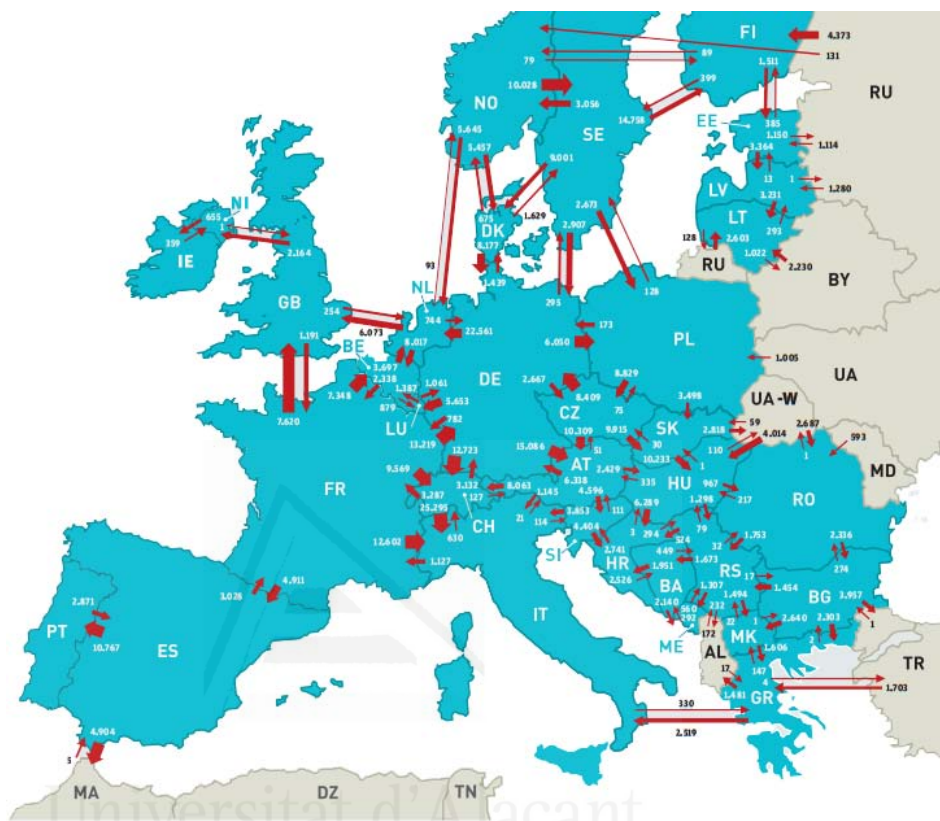


Figura 1.8 Intercambio eléctrico entre países europeos y limítrofes (Red Eléctrica de España, 2013)

Un ejemplo es la red de intercambio eléctrico entre los países miembros de Europa y los países limítrofes. La figura 1.8 muestra los intercambios eléctricos mayores a 100kV entre países vecinos del continente europeo en 2012 (Red Eléctrica de España, 2013) lo que resalta la interconexión de las redes eléctricas de dichos países, con el fin de importar o exportar en función de donde se originen situaciones de congestión (Kumar et al., 2005). El transporte de la electricidad



origina pérdidas de corriente eléctrica debidas al efecto Joule³, por lo que para minimizarlas se pueden utilizar diversas acciones aisladas o combinadas entre sí. En primer lugar, si existe capacidad de almacenamiento se puede almacenar la energía para disponer de ella cuando sea necesario. Esta alternativa, en la práctica, suele aplicarse en sistemas que requieran una capacidad de almacenamiento baja-media. Las expectativas para sistemas que requieran una gran capacidad de almacenamiento pasan por consolidación de las tecnologías asociadas a las pilas de combustible o hidrógeno (Dyer, 2002).

Otra técnica comúnmente utilizada es la transformación de la tensión aplicada, bien incrementándola cuando vaya a recorrer grandes distancias o bien decrementándola cuando vaya a ser consumida. Esto es así debido a que el efecto Joule es inversamente proporcional a la tensión de la corriente que está circulando. En tercer lugar, la tarea que tiene una gran repercusión sobre los sistemas eléctricos distribuidos es la planificación de la distribución, ya que debe aportar la inteligencia para decidir de donde obtener la electricidad y planificar el recorrido óptimo hasta llegar al destino, cumpliendo una serie de restricciones que garanticen los objetivos marcados y la integridad del sistema. El trabajo plasmado en esta investigación se encuentra bajo el amparo de este último campo de acción, la planificación de la distribución eléctrica.

1.2.7. Planes de acción

Los retos planteados anteriormente no son independientes entre sí, sino que existen relaciones entre ellos, igualmente las acciones que deben dar solución a dichos retos no deben concebirse de forma aislada, sino que se han de orquestar de forma conjunta. El 7º programa marco para la financiación de investigación y desarrollo de actividades científicas entre los años 2007 y 2013 de la Unión Europea, define un programa específico para la investigación en energía, que está dotado con 2.35 billones de euros. Las áreas de acción definidas en dicho programa son: hidrógeno y pilas de combustible, generación de electricidad a partir energías renovables, producción de combustibles a partir de energías renovables, energías renovables para la calefacción y refrigeración, captura de

³ Fenómeno por el cual una parte proporcional de la corriente eléctrica que circula por un conductor se transforma en calor debido a las colisiones entre los electrones y los átomos del conductor.



CO₂ y tecnologías de almacenamiento, tecnologías para un uso limpio del carbón, redes eléctricas inteligentes, eficiencia energética y ahorro y conocimiento para el desarrollo de políticas energéticas (European Commission, 2011). Las líneas de acción definidas son mayoritariamente tecnológicas, pero no abordan las cuestiones relacionadas con los hábitos de uso y concienciación de los usuarios. Los aspectos sociales pueden influenciar en mayor o menor medida la viabilidad del desarrollo energético sostenible. Un ejemplo de la importancia de la concienciación social se puede observar en el reciclaje de vidrio, papel, envases, etc. Es necesario desarrollar la tecnología y procedimientos que económicamente permitan reciclar dichos residuos, aunque el éxito está subordinado a que los ciudadanos hagan el esfuerzo de clasificarlos y llevarlos a los contenedores habilitados.

Una disminución del consumo energético o aumento en la eficiencia energética de los aparatos no es condición suficiente para obtener un ahorro energético efectivo, ya que según enuncia la paradoja de Jevons formulada en plena revolución industrial “El aumento de la eficiencia disminuye el consumo instantáneo pero incrementa su uso, lo que provoca un incremento del consumo total” (Jevons, 1866). Dicha paradoja evidencia el papel activo y determinante que tienen los usuarios sobre el consumo energético, al ser ellos los responsables de un uso racional. Esto no es siempre así, por lo que surge la necesidad de concienciar a los usuarios para que adquieran unos hábitos energéticamente racionales.

Por lo tanto se pueden diferenciar dos familias de soluciones: las tecnológicas, orientadas al desarrollo tecnológico; y las sociales que hacen referencia a la concienciación de los ciudadanos. Respecto a las soluciones tecnológicas las líneas de acción definidas en el 7º programa marco de la Unión Europea en el área de Energía se generalizan en: el desarrollo de fuentes de energía renovables y no contaminantes; métodos para la preservación y conservación del medio ambiente; ofrecer productos con mayor eficiencia energética, sobre todo aquellos que mayor repercusión tienen sobre el consumo global; mejorar las técnicas y componentes para el almacenamiento, transporte y transformación de la energía; y por último mejorar las estrategias para una distribución inteligente de la energía. En cambio, las soluciones sociales, hacen referencia a la concienciación de los usuarios para un uso racional de los aparatos y por tanto de la energía que consumen; y fomentar los criterios ecológicos para la preservación del medio ambiente y de sus recursos naturales.



Familia	Solución
Tecnológicas	Fuentes de energía renovables
	Preservación del medio ambiente
	Aumento de la eficiencia energética
	Almacenamiento, transporte y transformación
	Estrategias de distribución
Sociales	Uso racional de los aparatos/energía
	Concienciación ecológica

Tabla 1.4 Familias de soluciones para abordar los retos asociados al desarrollo energético sostenible

Ambas familias de soluciones no deben ser aisladas sino que es recomendable que se complementen unas con otras, con el fin de obtener una mayor repercusión, trascendencia y realimentación mutua. Es por ello, que se pueden obtener soluciones tecnológico-sociales mediante el solapamiento de ambos conjuntos, de forma que se obtienen soluciones tecnológicas cuyo objetivo es fomentar los hábitos de consumo racionales en la sociedad. A su vez, se pueden distinguir entre dos subtipos de soluciones.

En primer lugar, activas, que persiguen concienciar a los ciudadanos para que adquieran dichos hábitos de consumo. Y en segundo lugar, transparentes, orientadas a facilitar de forma desatendida las acciones para conseguir reducir consumos innecesarios, picos de consumo instantáneos y gestionar eficientemente la energía disponible, intentando en la medida de lo posible que el usuario se involucre únicamente en situaciones potencialmente críticas. La figura 1.9 muestra el solapamiento de las familias de soluciones tecnológicas y sociales, dando lugar a las soluciones transparentes y activas. Para ilustrar ambos tipos de soluciones se define un problema sencillo y cómo se abordaría en cada caso. El problema en cuestión se da en los vehículos, concretamente al apagar el motor del coche dejando accidentalmente las luces encendidas. Una solución de tipo



activa, implantada comúnmente, podría ser emitir un sonido, para alertar al conductor y que él decida lo que hacer. En cambio, el enfoque transparente tendría capacidad de decisión para apagar automáticamente las luces, por ejemplo si previamente se ha realizado una maniobra de aparcamiento, o dejarlas encendidas y avisar al usuario para que sea él quien decida.

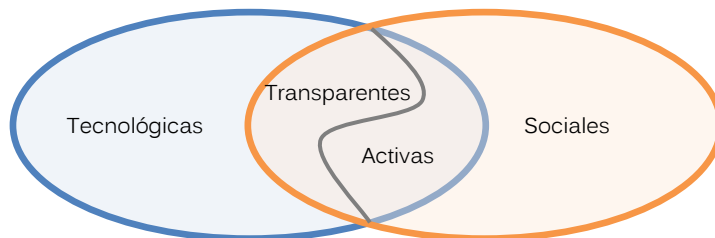


Figura 1.9 Taxonomía de soluciones tecnológico-sociales transparentes y activas que persiguen el consumo energético sostenible



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

2. Objetivos

El objetivo general de la investigación es avanzar en la línea del desarrollo sostenible, concretamente en lo que se refiere a desarrollo energético sostenible (Dincer and Rosen, 2007), enfocando los esfuerzos en los problemas asociados a la gestión de la distribución eléctrica independientemente de la propia naturaleza del sistema a controlar. El ámbito del problema abordado en este trabajo se puede observar en la figura 1.10, donde se muestran las distintas líneas de acción para la mejora de la sostenibilidad energética. Una vez identificado el ámbito del problema, se concibe un modelo de sistema eléctrico desde el punto de vista funcional con la potencia suficiente gestionar la distribución eléctrica en cualquier contexto. Dicho modelo debe proporcionar estrategias para la toma de decisiones a la hora de distribuir la electricidad, por lo que debe soportar la generación de estrategias propias en función de los requerimientos particulares de cada sistema eléctrico. Las soluciones aportadas deben minimizar el impacto medioambiental asociado al uso de fuentes de energía, además de maximizar, en la medida de lo posible, la satisfacción de los usuarios de los potenciales centros de consumo de dicha energía. Para alcanzar tal objetivo se pretende fomentar el uso de fuentes de energía renovables, en detrimento de las que mayor repercusión tienen sobre el medio ambiente y gestionar activamente la demanda energética, con el fin de reducir los picos de consumo y mantener un consumo constante a lo largo del tiempo. Se persigue, además, la integración del sistema gestor de la electricidad en un contexto real, por lo que la investigación adquirirá una fuerte componente aplicada. Para ello, se hace patente la necesidad de particularizar el modelo general para la obtención de arquitecturas orientadas a gestionar la distribución de sistemas concretos.



Figura 1.10 Ámbito del problema abordado



Se propone el desarrollo de un entorno de ayuda al diseño que permita validar el modelo haciendo uso de simulaciones en las etapas iniciales. Esto es viable gracias a que las soluciones se obtienen particularizando el modelo, de forma que se consiga delimitar la experimentación dentro de un rango acotado. El entorno de ayuda al diseño permite diseñar sistemas eléctricos de una forma ágil, modular y escalable, facilitando la simulación del comportamiento del sistema bajo una serie de premisas. Una vez validada la simulación, o en su defecto subsanado el diseño, se inicia el proceso automatizado de concepción de la solución tecnológica que permita gestionar la distribución eléctrica en dicho sistema. Establecida la hipótesis de partida se procede a la validación y verificación mediante una experimentación incremental, basada en simulación.

Específicamente, los objetivos planteados en la investigación son:

- Concebir un modelo formal de sistema eléctrico capaz de representar redes de componentes capaces de manipular electricidad. El modelo debe ser general para poder utilizarse sistemáticamente en la obtención de soluciones arquitecturales en problemas pertenecientes a diversos ámbitos, contextos o niveles de abstracción. Las soluciones concebidas deben tratar los problemas asociados a la distribución eléctrica entre los elementos constituyentes haciendo uso de sus respectivas características intrínsecas.
- Diseñar una estrategia de gestión eléctrica distribuida, modular, autónoma y escalable, que sea integrable en el modelo y optimice la distribución de la electricidad desde las fuentes hasta los centros de consumo en función de los requerimientos y/o criterios de diseño de dicha instalación. Se persigue preservar el medio ambiente y garantizar la sostenibilidad energética mediante el fomento de fuentes de energía renovables.
- Diseñar y desarrollar un entorno de ayuda al diseño de redes y sistemas eléctricos, que facilite la validación y verificación del modelo y la estrategias de gestión, mediante un proceso de refinamiento cíclico que permita la retroalimentación mutua hasta alcanzar un estado plenamente maduro. Asimismo, la capacidad de simular la distribución eléctrica en la arquitectura particularizada del modelo en el entorno facilita económica y temporalmente la evaluación de dicha solución gracias a las ventajas de la inserción de una etapa previa de simulación a la de prototipado.

Por lo tanto, la aportación fundamental de este trabajo es la generalidad del modelo de sistema eléctrico que permite implementar un entorno de ayuda al



diseño de arquitecturas para la gestión eléctrica distribuida de sistemas concretos por particularización. El entorno facilita el prototipado de dicha arquitectura mediante la validación y verificación previa que ofrece la etapa de simulación.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



3. Antecedentes

La recopilación de trabajos se ha realizado en base a la relación existente entre los objetivos de dichos trabajos y los propuestos anteriormente. La naturaleza de las relaciones permite discernir entre distintas familias de soluciones aplicables a este problema. En primer lugar, se centra la atención en soluciones orientadas hacia la distribución óptima de energía en redes que manejan grandes cantidades de energía eléctrica. El análisis a este macro-nivel va a permitir reducir el nivel de abstracción paulatinamente para profundizar en el modelado de la gestión energética a menor nivel, como el que se produce en viviendas residenciales, vehículos, robótica móvil, hasta alcanzar a pequeños dispositivos móviles que presentan micro-demandas energéticas.

La comprensión y abstracción de cada uno de los niveles determina los rasgos característicos comunes a todos los niveles y las propias de cada familia de soluciones. Llegando a la conclusión de que este tipo de problemas se pueden resolver mediante técnicas de inteligencia artificial siempre y cuando tengamos en cuenta una serie de restricciones, como pueden ser: satisfacer las peticiones en tiempo real, equilibrio entre la generación y demanda, coste económico de la distribución de la energía, la distinta naturaleza del comportamiento de la demanda, multitud de consumidores, clientes y servidores, marco legal, etc.

3.1. Redes inteligentes

Las soluciones empleadas en el modelado de gestión de cantidades del orden de megavatios y kilovatios prestan especial atención a la distribución y transmisión de la electricidad. Estas fases son determinantes ya que la energía es consumida a una gran distancia de donde fue generada. La distribución es importante porque determina el recorrido que va a realizar la electricidad intentando encontrar el camino más corto, minimizando costes tanto económicos como temporales. El transporte se encarga de llevar la electricidad desde el nodo origen hasta el nodo final a través del recorrido establecido en la distribución. Los nodos que permiten la transmisión de la electricidad tienen un límite de cantidad de electricidad máxima a transferir en un momento determinado (Christie et al., 2000). Además la transmisión eléctrica repercute en un coste económico mediante



pérdidas de energía eléctrica debido al efecto Joule y situaciones de congestión. La congestión se produce cuando un generador no es capaz de proporcionar toda la energía eléctrica que requiere el circuito al que está conectado y por lo tanto necesita obtener la energía eléctrica de un segundo generador, el cual presenta un coste superior al primero. Este último factor es de especial importancia a la hora de distribuir la energía eléctrica ya que algunas situaciones de congestión conllevan que el segundo generador pueda incrementar el precio por MWh de forma indiscriminada. Existen distintas estrategias cada una de ellas con ventajas y desventajas, aunque todas tienen en cuenta las interacciones entre las limitaciones de los sistemas de distribución y la eficiencia económica del mercado energético. La gestión de los mercados eléctricos se puede realizar mediante diversas técnicas y algoritmos determinados por la legislación vigente en cada continente, país, estado, región, etc. Es por ello que en general los sistemas eléctricos presentan complejos requerimientos que no siempre llegan a cumplirse como la estabilidad y la regulación del voltaje, que han sido considerados problemas importantes de en la seguridad de los sistemas (Bevrani et al., 2008).

A continuación se realiza un análisis de dos modelos de mercados eléctricos descentralizados. Modelo basado en transacciones, y modelo basado en el precio de área.

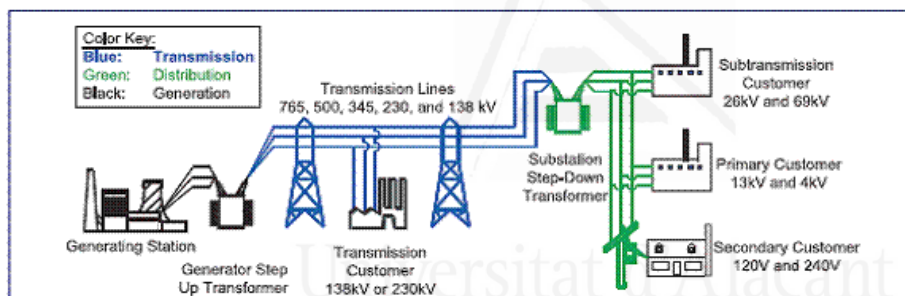


Figura 1.11 Esquema del flujo de la electricidad en Estados Unidos (North American Electric Reliability Council, 2008)

El modelo basado en transacciones está implantado entre otros países en algunos estados de Estados Unidos y España. La figura 1.11 muestra el esquema de flujo de electricidad de Estados Unidos, en el que se diferencian tres etapas: generación, transmisión y distribución (North American Electric Reliability Council, 2008). La generación incluye las instalaciones en las que se genera la electricidad así como la central transformadora que eleva la tensión. La etapa de transmisión



está formada por las líneas de alta tensión que portan la electricidad hasta las subestaciones transformadoras. La etapa de distribución está formada por las subestaciones transformadoras ubicadas cerca de núcleos urbanos o industriales, para disminuir la tensión y por las líneas hasta los centros urbanos e industriales.

La estructura interna de Estados Unidos basada en estados y el liberalismo económico llevó al gobierno a introducir una serie de requerimientos para fomentar la competencia y animar al desarrollo de las estructuras de las regiones. Una gran cantidad de la energía eléctrica generada en Estados Unidos pertenece a empresas privadas que utilizan sus propias instalaciones. La Comisión Federal Reguladora de la Energía (FERC) de los Estados Unidos establece el acceso abierto e indiscriminado a los servicios de transmisión y acceso abierto al mismo tiempo al sistema de información (OASIS) (Kim et al., 2008). Esto permite que todas las compañías tengan la misma oportunidad de proporcionar servicios de transmisión de energía entre sus generadores y sus clientes. Para ello cada operador de sistema independiente (ISO) se encarga de monitorizar su sistema regional de transmisión y de calcular la capacidad de transferencia disponible (ATC). (North American Electric Reliability Council, 1996) define el ATC como una medida de la capacidad de transferencia disponible en la red de transmisión física para la futura actividad comercial por encima o por debajo de la que ya existe. De forma práctica el ATC es una medida de la cantidad de energía que se puede transportar desde un nodo inicial hasta otro final. Estos valores son publicados en el sistema de información OASIS para la siguiente hora en una página web, así antes de realizar una transacción se podrá consultar si es posible realizarla y reservarla si se da el caso. Este sistema basado en ATC presenta problemas ya que la congestión aparece rápidamente (Christie et al., 2000).

El mercado eléctrico español se encuentra dentro del modelo basado en transacciones. La liberalización del mercado eléctrico ha repercutido en la separación de empresas distribuidoras y comercializadoras, siendo las últimas las que se encargan de vender la energía a los clientes finales. Las principales entidades que intervienen son: la Comisión Nacional de la Energía (CNE), operador de mercado (MO) y el operador del sistema (SO).

La CNE es el ente regulador de los sistemas energéticos. Sus objetivos son velar por la competencia efectiva en los sistemas energéticos y por la objetividad y transparencia de su funcionamiento, en beneficio de todos los sujetos que operan en dichos sistemas y de los consumidores. A estos efectos se entiende por



sistemas energéticos el mercado eléctrico, así como los mercados de hidrocarburos tanto líquidos como gaseosos (CNE, 2013).

La Compañía Operadora del Mercado Español de Electricidad (OMEL) es el operador de mercado que recibe la predicción de la generación energética y de la demanda para cada una de las horas del día siguiente, y así establece el mercado conforme a criterios económicos.

La Red Eléctrica de España se corresponde con el operador de sistema y determina la viabilidad técnica de la distribución de la energía generada. Para ello detecta y elimina las restricciones eléctricas después de que el mercado haya sido establecido.

El funcionamiento del mercado eléctrico español está descrito en (Furió and Meneu, 2010), (Ciarretaa et al., 2012). El mercado está compuesto por el "pool", que es donde se cruzan las ofertas de producción y las solicitudes de compra de los agentes de mercado y externos para cada una de las horas del día. La OMEL realiza una predicción de necesidades energéticas en función de consumos de años anteriores, previsiones climáticas y posibles eventos. En función de las necesidades energéticas, entran en el pool cada una de las distintas empresas generadoras en distintos instantes de tiempo en función de su naturaleza. De esta forma, se prioriza la utilización de determinados tipos de fuentes de energía, al subastarlas de forma ordenada. En primer lugar entran las fuentes de energía nuclear y renovable. Las renovables suelen ofertar su producción a precio 0€/MWh, y a las nucleares, también les conviene poner dicho precio en algunas horas, por la ineficiencia del apagado y encendido debido a la gran inercia térmica. La venta de la producción nuclear y renovable está asegurada a un precio todavía desconocido. Seguidamente, van entrando al pool el resto de productores de forma ordenada en función del precio de venta, de menor a mayor, hasta que se venda toda la energía requerida para cada hora del día siguiente, conforme a la predicción realizada por la OMEL. Se establece como precio marginal, el del último productor en entrar al pool, lo que supone que toda la energía que se había subastado inicialmente se compra a dicho precio.

Una vez que se ha establecido dicha subasta, el operador del sistema, se encarga de determinar la viabilidad técnica, teniendo en cuenta restricciones eléctricas. Las principales eléctricas en el mercado español son de dos tipos: sobrecarga en las ramas de la red y restricciones de tensión. Las sobrecargas en ramas de la red son poco comunes en el mercado español, en cambio las



restricciones de tensión son más comunes. Se deben a bajas tensiones, por lo que la solución pasa por conectar generadores autónomos en las zonas en las que se producen para que ayuden con potencia reactiva y activa al sistema (Miguel et al., 2004). Las restricciones eléctricas son subsanadas mediante el incremento o el decremento de la electricidad de las unidades de generación conectadas y conectando nuevas unidades de generación autónomas. Es importante tener en cuenta el coste económico que supone conectar nuevas unidades de generación, por lo que es una variable más a considerar a la hora de maximizar la eficiencia.

Una vez que se ha asegurado la viabilidad técnica de la subasta del día siguiente, en ocasiones puede suceder que no se cumpla tal y como se predijo el día anterior, por lo que aparece un mercado intradiario, en el que se realizan procesos de subasta en 6 sesiones cada 4 horas, en las que se refina el casamiento de la demanda con la oferta. En último lugar, existen productores que no entran en el pool, que garantizan la disponibilidad, de forma que si es necesario se pueden utilizar para equilibrar la demanda con la producción.

El modelo actual presenta inconvenientes derivados de que todos los productores venden la energía al mismo precio independientemente de sus costes reales, favoreciendo a aquellas que tienen sus instalaciones amortizadas.

El modelo basado en el precio de área está implantado conjuntamente en Noruega, Suecia, Finlandia y Dinamarca. Una característica relevante es que alrededor de la mitad de la capacidad de generación está basada en centrales hidroeléctricas (Amundsen and Bergman, 2006) y que el uso principal de la electricidad es la calefacción, que depende de las variaciones climáticas. Dicho trabajo enfatiza en que el modelo no es aconsejable en otros países debido a las características propias de la región.

Los elementos clave del modelo para la comercialización de la electricidad es el "Nord Pool", que es el mercado que establece el precio del sistema mediante subastas para cada hora, y cuatro operadores de sistema asociado a la red nacional de cada país. La distribución es responsabilidad de cada una de las compañías generadoras. La distribución la realizan cada uno de los agentes que participan en el mercado basándose en el aumento de los beneficios propios. Esto hace que sea el modelo que más se asemeja a un mercado libre real. La congestión se soluciona mediante distintas técnicas: tarifas, precio de áreas y adquisición. La técnica basada en tarifas de conexión se caracteriza, en que los generadores y los consumidores pagan una tarifa a la red a la que están



conectados. Existen tres niveles de red: nacional, regional y local, donde cada red paga una tarifa a la red de orden mayor a la que está conectada. Las transmisiones entre redes de nivel nacional no pagan tarifas. Las tarifas están compuestas por tres conceptos: carga de inversión que es pagada una única vez por las conexiones principales, carga energética que se paga por MWh, y carga de capacidad basada en los picos consumidos o en la capacidad de generación. La técnica precio de área está basada en que cuando se predice congestión, el operador de sistema declara el sistema dividido en precios de área. Dicha división se produce en los cuellos de botella en los que se prevé la congestión. Si no ocurre congestión los precios de área se unen volviendo a ser uno solo. Si aparece la congestión los precios de área se modificarán para satisfacer las restricciones de transmisión, las áreas con sobregeneración tendrán que disminuir el precio y las áreas con exceso de consumo deberán aumentar el precio de área. Adquisición es la técnica que se utiliza cuando aparece congestión después de la distribución de los mercados en tiempo real. Consiste en aumentar o disminuir la generación de energía de los operadores del sistema regulador de los mercados (Christie et al., 2000).

El Nord Pool utiliza el procedimiento denominado "certificados verdes" para fomentar el uso de energías renovables. El gobierno otorga un certificado verde a su productor por cada GWh generado con energías renovables. Por otro lado obliga a los productores no renovables a comprar un determinado número de certificados. Este procedimiento contrasta con el utilizado en España y Estados Unidos, denominado "feed-in-tariffs", que otorga condiciones económicas favorables para el uso de productores renovables.

Descritos los principales modelos de mercados energéticos se presentan distintas familias de técnicas y algoritmos utilizados a la hora de satisfacer los requerimientos de los sistemas energéticos y de gestionar la distribución eléctrica.

Según (Miguelez et al., 2004) los requerimientos que presenta el sistema español hacen que no existan técnicas capaces de satisfacerlos totalmente, aunque existen dos algoritmos capaces de satisfacerlos parcialmente: Unit Commitment Algorithms (UCA) y Optimal Power Flow Algorithms (OPF).

Unit commitment algorithms (Shaw, 1995) se encarga de optimizar un sistema energético dentro de un intervalo temporal teniendo en cuenta un conjunto de condiciones de entrada. En un intervalo corto de tiempo es capaz de tomar decisiones de encendido y apagado de las unidades dentro de ese periodo.



Según (Migueluez et al., 2004) las distintas familias de algoritmos UCA modelan el sistema mediante una red de flujo continuo de electricidad. Esto permite solucionar las sobrecargas en las ramas aunque las restricciones de voltaje no es capaz de satisfacerlas.

El flujo óptimo de energía (OPF) es una técnica que se encarga de minimizar los costes de funcionamiento del generador, teniendo en cuenta el conjunto de restricciones que representan al modelo de transmisión. En situaciones en las que no existe congestión se comporta como un modelo económico simple, donde se minimiza el coste de generación de energía reduciendo el coste de cada uno de los generadores teniendo en cuenta dos restricciones. La primera de ellas es que la electricidad que puede obtener cada generador tiene unos límites mínimos y máximos. La segunda es que la electricidad generada debe ser igual a la consumida por las cargas.

Cuando se produce congestión se añaden criterios económicos mediante restricciones de igualdad. De la misma forma se pueden añadir restricciones de desigualdad para tener en cuenta el flujo, intensidad de las líneas de transmisión y voltaje en las subestaciones. El OPF resultante se suele denominar algoritmo de flujo óptimo de energía con restricciones de seguridad (SCOPF) (Christie et al., 2000). Existen implementaciones de países como Reino Unido, Australia, Nueva Zelanda, España etc. Se encarga de optimizar el estado de un sistema energético en un escenario e instante dado. Como las optimizaciones se realizan para cada escenario, las relaciones entre escenarios no se tienen en cuenta. OPF siempre modela la red y se pueden utilizar distintas funciones objetivo según la finalidad de la aplicación (Huneault and Galiana, 1991). Las principales limitaciones de las familias de algoritmos OPF no tienen en cuenta el efecto de inyección de energía activa para incrementar el voltaje. La mayoría satisfacen restricciones cuando una línea está fuera de servicio, pero no en los casos en los que hay más de 1 línea inoperativa. Ninguno considera la conexión de unidades generadoras autónomas mediante variables binarias. La mayor parte de las referencias presentan resultados obtenidos de pequeños sistemas energéticos (Migueluez et al., 2004).

(Migueluez et al., 2004) propone un sistema para satisfacer el mercado español basado en dos etapas: la primera es la etapa de viabilidad que se encarga del envío de la electricidad y de ajustar el voltaje de los recursos de control de voltaje (transformadores, generadores, condensadores...) minimizando el coste y cumpliendo con la normativa española mediante algoritmos heurísticos. Dentro de



esta etapa se gestionan las restricciones de voltaje y de sobrecarga de las ramas. Seguidamente la etapa de optimización se encarga de realizar un ajuste más fino para cada hora en los recursos de control de voltaje mediante un algoritmo OPF, minimizando las pérdidas por transmisión utilizando el método de subgradiente.

La resolución OPF, que hace viable la distribución a partir de las restricciones eléctricas, presenta una gran complejidad. Requiere de métodos iterativos que hagan converger la solución hasta un valor preestablecido (Pazderin and Yuferev, 2009). Existen varias familias de métodos para resolver el conjunto de ecuaciones no lineales: Gauss-Seidel (Teng, 2002), (Messalti et al., 2012); Newton-Rapshon (Tinney and Hart, 1967), (Pazderin and Yuferev, 2009); Fast-decoupled-load-flow (Stott and Alsac, 1974), (Yao and Li, 2012). Por otra parte, existe un método no iterativo denominado Holomorphic embedding load flow method (Trias, 2012).

El rendimiento de dichos métodos utilizando GPU se compara en el trabajo (Chunhui et al., 2012). El método Newton-Rapshon presenta mayor incremento de rendimiento al ejecutarse sobre GPU, por el contrario Gauss-Seidel el peor, y el fast decoupled se queda en medio. En sistemas pequeños, el uso de GPU no es mejor que sobre CPU, en cambio, cuando la talla del problema aumenta, se hace patente las ventajas del uso de GPU. Por ejemplo, para problemas de 1000 buses, el uso de GPU aumenta el rendimiento en 53 veces.

Los primeros métodos utilizados son de la familia Gauss-Seidel, que se caracterizan por sus bajos ratios de convergencia y bajos requerimientos de memoria. Se suelen utilizar cuando otros métodos fallan (Trias, 2012). En líneas generales los métodos de la familia Newton-Rapshon son más adecuados debido a su ratio de convergencia cuadrático, pero requieren mayores recursos computacionales. El método Newton-Raphson destaca por su excelente convergencia, aunque tiene como principal desventaja que el cálculo de la matriz Jacobiana debe ser recalculada en cada iteración (Teng, 2002). La familia de métodos desacoplados derivados de Newton-Rapshon, Fast-decoupled-load-flow son los que mayor éxito han tenido, siendo utilizados ampliamente en la industria (Trias, 2012). Todos estos métodos son iterativos, y tienen los problemas derivados de la convergencia, debido a que es posible que no converga si no se eligen el estado inicial adecuado. El otro problema es que el sistema tiene multitud de soluciones, por lo que no se puede controlar hacia qué solución va a converger. Estos problemas no son especialmente importantes, ya que en condiciones



normales de funcionamiento no aparecen problemas de convergencia (Trias, 2012).

Por su parte, el método Holomorphic embedding load flow es un enfoque no iterativo. Está basado en el uso del dominio complejo y en funciones holomórficas. Esto garantiza matemáticamente que se pueda encontrar una solución con una precisión adecuada (Trias, 2012).

Los datos que son utilizados para realizar los cálculos OPF, son recogidos por dispositivos de adquisición de datos, normalmente controlados por sistemas tipo SCADA (Ebata et al., 2000). Por otro lado existen otra familia de dispositivos denominados unidades de medición fasorial (PMU) (Phadke, 1993), que permiten observar el estado dinámico de los sistemas eléctricos con gran precisión. Es un equipo de medida que además puede proporcionar funciones de protección y de control. La principal diferencia con los sistemas SCADA tradicionales radica en la frecuencia de lectura de las magnitudes a monitorizar. Haciendo uso de PMU se pueden realizar de 20 a 60 mediciones por segundo, mientras que utilizando sistemas SCADA para realizar 1 medición se requiere un tiempo del orden segundos (Avila-Rosales et al., 2009). Los avances tecnológicos y las investigaciones en este campo, permiten mediante las PMU, obtener fasores de tensiones y corrientes de forma sincronizada (Lozano et al., 2012).

La técnica más común para la obtención de fasores es aplicar transformadas discretas de Fourier (DFT) sobre la señal eléctrica. Se define un sincrofasor como un fasor que ha sido estimado en un instante concreto denominado etiqueta temporal (Time Tag) del fasor. A la hora de realizar las mediciones en grandes sistemas eléctricos es necesario sincronizar las etiquetas temporales de cada fasor, de forma que para cada instante de tiempo se obtiene el fasor asociado a cada punto de medición (De La Ree et al., 2010). La sincronización se realiza utilizando un reloj que proporciona un pulso por segundo, dicha señal es proporcionada por un receptor GPS. Las etiquetas temporales se obtienen en intervalos que son múltiplos del periodo de la frecuencia nominal del sistema eléctrico (De La Ree et al., 2010). Las PMU se utilizan en distintas aplicaciones que permiten aumentar la eficiencia de las redes eléctricas. Su uso está extendido entre las compañías eléctricas y adquiere especial relevancia dentro de las redes inteligentes. Más información en el Anexo A.

Una vez que se han analizado los distintos métodos OPF que tienen en cuenta las restricciones eléctricas a la hora de distribuir y los distintos sistemas de



monitorización, control y protección a nivel eléctrico que garantizan la viabilidad de la distribución eléctrica, se procede a analizar los sistemas de gestión de la distribución eléctrica de alto nivel.

Los sistemas de gestión de la planificación se basan en algoritmos de planificación que reduzcan al mínimo el coste económico, que satisfagan las necesidades, y garanticen la estabilidad de la red y la regulación de la tensión (Bevrani et al., 2008). Existen multitud de propuestas de alto nivel que persiguen optimizar la distribución eléctrica. Las propuestas se pueden agrupar en:

- Sistemas basados en autómatas / redes de petri: (Wang et al., 2013), (Zhao et al., 2012), (Calderaro et al., 2011), (Iglesias and Gálvez, 2010),...
- Métodos de búsqueda aleatorios, que según (Kothari, 2012) comprende Particle Swarm Optimization, Genetic Algorithms, Evolutionary Programming, Ant Colony Search, Tabú Search: (Moradi and Abedini, 2012), (Abou et al., 2010), (AlRashidi and El-Hawary, 2009), (Golestani and Tadayon, 2011), (El-Zonkoly, 2011), (Men-Shen and Fu-Yuan, 2010), (Falaghi et al., 2009), (Colson et al., 2009), (Navarro and Rudnick, 2009), (Franco et al., 2012),...
- Lógica difusa: (Ramirez-Rosado and Dominguez-Navarro, 2006), (Schweickardt and Miranda, 2009), (Falaghi et al., 2009), (de Souza and de Almeida, 2010),...
- Redes neuronales: (Siano et al., 2012), (Gutierrez-Martinez et al., 2011),...
- Sistemas multiagente: (Merdan et al., 2013), (Lagorse et al., 2010), (Nguyen et al., 2010), (Zeng et al., 2009), (Pipattanasomporn et al., 2009), (Li et al., 2007),...
- Otras heurísticas: (Srinivasa Rao et al., 2011), (Min et al., 2002), (Tsikalakis and Hatziaargyriou, 2011), (Pathak et al., 2007),...

El valor potencial de la tecnología de sistemas multi-agente para la industria energética es descrito por (Roche et al., 2010) y (McArthur et al., 2007), debido a que introducen las bondades de los sistemas multi-agentes para el desarrollo de aplicaciones de gestión energética.

A continuación se detallan algunos de los trabajos basados en sistemas multiagentes enumerados anteriormente.

(Merdan et al., 2013) introduce un sistema de monitorización, diagnóstico y coordinación de generación y consumo distribuido basado en sistemas multiagente. Efectúa un control basado en mantener la tensión dentro de un rango. Presenta una arquitectura de sistema multiagente basado en 2 capas de agentes.



La primera capa, denominada “capa de gestión” se encarga de gestionar la estabilidad de la red, soportando la interfaz con los usuarios a través de un SCADA. En esta capa se encuentran 2 tipos de agentes: “agentes del sistema” y “agentes de datos”. El agente del sistema se encarga de monitorizar la tensión y la frecuencia con el objetivo de detectar situaciones de congestión o fallos en la red. Tiene la capacidad de modificar el flujo eléctrico con el fin de replanificar la distribución eléctrica si el sistema se colapsa. El agente de datos se encarga de aplicar técnicas de minería de datos con el fin de analizar el consumo eléctrico. Es capaz de realizar previsiones de consumo, permitiendo la interacción con personal humano.

La segunda capa, denominada “capa de ejecución” es la que representa la topología de la red, facilitando la comunicación entre los agentes, lo que permite las interacciones entre ellos. En esta capa se pueden encontrar diversos agentes que representan a un dispositivo concreto: agente bus, agentes línea, agente fuente, agente carga, agente subestación y agente intercambio. La arquitectura de agentes está condicionada al tipo de dispositivo que se quiere representar y la potencia expresiva a la hora de representar redes complejas está condicionada al uso de agentes subestación, que son los que permiten interconectar distintas redes. No contempla la gestión de cargas (Palensky and Dietrich, 2011).

(Lagorse et al., 2010) propone un sistemas de gestión de fuentes de energía distribuido. La propuesta está centrada en un generador fotovoltaico, baterías químicas, supercondensadores y conexión a la red eléctrica. La distribución eléctrica se realiza a través de un testigo que decide cual es el agente que se encarga de efectuar el control. A medida que el testigo va pasando de un agente a otro, se realiza el reparto de carga computacional, garantizando que todos los agentes intervengan. En este caso, las cargas no están controladas por ningún agente, debido a que asume que es el usuario final quien ha de hacerlo. Este enfoque es pasivo, ya que la gestión de carga la realiza el propio usuario, lo que repercute en que el sistemas no sea capaz de reducir el consumo energético autónomamente.

(Nguyen et al., 2010) aplica el algoritmo “cost-scaling push relabel” (CS-PR) para solucionar el problema del OPF en un entorno de agentes distribuido. Este trabajo no hace hincapié en la topología de agentes a utilizar, sino que compara el algoritmo CS-PR con el algoritmo clásico de camino mínimo en un grafo. El algoritmo CS-PR requiere un menor número de mensajes intercambiados entre los



agentes en el caso de gestionar una red de tipo radial, en cambio no se aprecia mejora alguna en redes de tipo malla.

(Zeng et al., 2009) introduce un sistema multi-agente para un sistema híbrido de generación distribuida que incorpora aerogeneradores, generación fotovoltaica, almacenamiento en baterías y conexión a la red eléctrica. La arquitectura de agentes está formada por un tipo de agente distinto para cada uno de los componentes que intervienen. En el caso de que se quieran incorporar nuevos tipos de fuentes de energía, se deben diseñar e implementar los correspondientes tipos de agentes.

(Pipattanasomporn et al., 2009) propone un diseño y desarrollo de sistema multiagente que proporcione inteligencia distribuida a las redes eléctricas. Está basado en una arquitectura de 4 tipos de agentes. El "agente de control" es responsable de monitorizar el sistema, detectar posibles situaciones de congestión y de obtener el precio del kWh. El "agente DER" se encarga de gestionar la información asociada a los recursos eléctricos distribuidos y su estado. El "agente usuario" es la interfaz que permite al usuario acceder a la información relevante. Por último, el "agente base de datos" se encarga de almacenar los mensajes intercambiados entre los agente y aquella información importante. La propuesta del sistema multiagente puede presentar problemas de escalabilidad debido a la arquitectura, que está basada en unos tipos de agente poco especializados y que por tanto realizan muchas acciones. El control lo realiza un único agente, el "agente de control", que recibe los datos del "agente DER", informa al usuario a través del "agente usuario" y almacena las acciones en el "agente base de datos".

(Li et al., 2007) presenta un agente basado en el sistema de control, que coordina la distribución de fuentes de energía en redes de distribución a gran escala. Utiliza un agente intermediario para la coordinación, lo que puede suponer el cuello de botella del sistema.

La mayoría de los trabajos relacionados no tienen en cuenta explícitamente los parámetros relacionados con el impacto ambiental. Aquellos que tratan de mejorar el uso de las fuentes de energía renovables no utilizan técnicas de reducción del consumo con el fin de satisfacer la demanda con la energía disponible. Otros en cambio presentan un modelo de agentes o estrategias de distribución eléctrica que pueden presentar problemas de escalabilidad.



3.2. Viviendas residenciales

Analizadas las grandes redes eléctricas se pasa al siguiente nivel, el de las viviendas residenciales. Se pretende analizar los modelos utilizados tanto para la gestión como para el consumo de eléctrico en viviendas y/o barrios residenciales.

Las grandes empresas generadoras de energía eléctrica tradicionalmente han sido las encargadas de proveer de energía a las viviendas residenciales. Esto ha sido así debido a la agrupación de las viviendas en núcleos urbanos, ya que de esta forma los costes de las instalaciones son compartidos entre todas las viviendas por lo que resulta rentable a las empresas. En la medida en que se han ido construyendo viviendas en emplazamientos alejados de las grandes urbes ha sido cuando las empresas han dejado de proporcionarles electricidad. En estas situaciones es donde se necesitan sistemas alternativos de obtención de electricidad. La etapa de distribución no tiene tanta importancia como en el escenario anterior, ya que los generadores de energía están situados cerca de los centros de consumo, sobre todo en escenario de generación distribuida. Este contexto más acotado va a permitir utilizar técnicas para aproximación de la cantidad de electricidad mediante modelado de consumo, y de la generación para viviendas.

La determinación de la cantidad de energía que necesita una vivienda residencial no es una tarea trivial, por lo que se hacen necesarios la utilización de modelos de consumo energético. (Aydinalp-Koksal and Ugursal, 2008) y (Aydinalp et al., 2003) realizan una comparación sobre tres tipos de modelos utilizados para determinar el consumo de eléctrico en barrios de viviendas residenciales y en viviendas residenciales asiladas. El primer modelo es denominado método ingenieril (EM). Requiere el desarrollo de una base de datos de un conjunto de viviendas. La base de datos contendrá información sobre el consumo energético de la cada vivienda y una detallada descripción de cada una de las viviendas. Este modelo proporciona un gran nivel de detalle y flexibilidad, pero no tiene en cuenta factores socio-económicos. El análisis de la demanda condicional (CDA) es el segundo modelo, basado en la regresión de atributos de consumo del conjunto de las viviendas. No tiene en cuenta el consumo individual de las viviendas y por lo tanto no necesita tener una descripción de cada vivienda. Requiere una base de datos de miles de viviendas para poder resolver las ecuaciones de regresión. Este modelo no requiere una base de datos con tanto nivel de detalle a costa de no ser tan flexible. En cambio sí que se pueden incluir factores socio-económicos.



El tercer modelo está basado en redes neuronales, más concretamente en perceptrones multicapa. Para modelar el conjunto de viviendas canadienses se utilizaron tres perceptrones multicapas separados. Las entradas de las redes consisten en las características y el uso de las viviendas, de los habitantes y las condiciones climáticas. Este modelo se sitúa entre los dos anteriores, ya que no provee tanto nivel de detalle como EM, ni tan poco como CDA.

(Arteconi et al., 2013) analiza el uso de sistemas de gestión de carga aplicados a 2 tipos de sistemas de climatización dotados de elementos de almacenamiento energético con el fin de evitar picos de consumo. Se realiza un análisis de la evolución de comportamiento de los sistemas (bomba de calor y suelo radiante) y del confort de los usuarios deshabilitando su uso de 16:00 – 19:00. En el caso de la bomba de calor, con menor inercia térmica, es determinante utilizar sistemas de almacenamiento, en cambio con el suelo radiante, que tiene una gran inercia térmica, el corte de suministro apenas tiene consecuencias. En este caso, el algoritmo de control es muy sencillo, deshabilitar el uso durante un periodo de tiempo conflictivo, para aprovechar la inercia térmica. Este sistema al ser sencillo puede dar buenos resultados en contextos poco dinámicos, en cambio si el contexto es dinámico, dicha estrategia de control, no será tan efectiva como podría llegar a ser.

(Hong et al., 2012) introduce un sistema discreto de control de cargas aplicado a sistemas de calefacción. El sistema de calefacción está formado por una bomba de calor alimentada por un generador eólico y una conexión a la red eléctrica, para utilizarla en caso de que no haya suficiente viento. El control distribuido está basado en un algoritmo para el control de temperatura, que establece dos niveles de toma de decisiones. El primer nivel empareja la demanda con la oferta y el segundo nivel tiene en cuenta las condiciones medioambientales para cada demanda individual. Debido a que el algoritmo es ad-hoc para el control de temperatura su uso en otros electrodomésticos no es inmediato.

(Kim et al., 2012) propone un sistema para controlar electrodomésticos basado en UPnP (UPnP, 2008), que utiliza el teléfono móvil como interfaz. La gestión de los electrodomésticos se realiza en base al precio del kWh. La gestión de carga la realiza en función de un algoritmo que tiene en cuenta la prioridad de los dispositivos y el coste económico. Este trabajo no tiene en cuenta al resto de viviendas para actuar de forma conjunta, considerando únicamente el criterio económico. El coste económico no suele reflejar la naturaleza de la fuente de



energía utilizada, ya que depende de las leyes que regulan el establecimiento del precio de la electricidad.

(Sarvapali et al., 2011) presenta un sistema multiagente para gestionar la carga en viviendas residenciales, aplazando el uso de determinados electrodomésticos en función de las variaciones del precio del kWh. Analiza los tipos de centros de consumo existentes en las viviendas y los clasifica en: húmedos (lavadora), fríos (nevera), calentadores de agua (calentador) y calentadores de espacio (radiadores). Seguidamente establece dos categorías de centros de consumo: "shiftable static loads", que son aquellas que se pueden aplazar y "thermal loads", que son las que dependen de la temperatura. Utiliza mecanismos de aprendizaje con el fin de prever el precio del kWh del día siguiente y en función de eso, planificar el uso de los electrodomésticos en función de la categoría a la que pertenezcan. Este trabajo presenta únicamente el criterio de aplazar el uso del electrodoméstico, lo que evita los picos de consumo en la red, pero no reduce el consumo energético de la vivienda. Además, a la hora de aplazar el uso de electrodomésticos, no tiene en cuenta a las viviendas vecinas, por lo que si todas las viviendas hacen uso del sistema, es posible que apareciera una tendencia a aplazar el uso de los electrodomésticos en franjas de hora similares, lo que repercutiría en nuevos picos de consumo.

(Xu et al., 2008) propone un modelo de influencia social para evaluar las políticas de precio y de educación en hábitos de consumo eléctrico en viviendas residenciales. También han implementado un simulador basado en ese modelo para simular el consumo eléctrico en un conjunto de viviendas mediante un sistema multiagente. Los factores que influyen en el consumo eléctrico en las viviendas son los siguientes:

- Ingresos familiares.
- Condiciones en las que se encuentran las viviendas.
- Dispositivos eléctricos que hay en las viviendas.
- Zona geográfica y clima.
- Tecnologías de ahorro de electricidad.
- Estrategias de establecimiento de precio de la electricidad para evitar el uso innecesario.
- Educación de los consumidores para que cambien los hábitos de consumo y así aumentar la eficiencia energética.
- Programas para incentivar el uso eficiente de la electricidad.



El modelo y por tanto el simulador tiene en cuenta las interrelaciones entre los vecinos de un área geográfica, para ello utilizar una matriz cuadrada donde los agentes de consumo son situados en los vértices. De esta forma cada centro de consumo influye socialmente a sus vecinos. Se consideran vecinos a los 9-vecinos situados en vértices contiguos. La aportación de este modelo es la influencia social que realizan unos centros de consumo sobre otros.

(Pearce et al., 2001) realizan un análisis de dos modelos utilizados para predecir el ahorro energético que se produce al utilizar unidades combinadas de calor y energía, mediante un motor Stirling (Lucia and Gervino, 2006), que se alimenta de gas y proporciona agua caliente y electricidad a la vivienda. El primero de los modelos es el llamado modelo de proporciones que requiere los consumos por temporada de electricidad y calor, y los periodos en los que se utiliza la calefacción en una vivienda típica. Es similar a los utilizados en la evaluación de la producción de energía y calor. El ahorro energético se puede calcular asumiendo que una proporción de la demanda eléctrica y calorífica la aporta la unidad combinada. El segundo es el modelo basado en la predicción de perfiles. Se encarga de definir perfiles de un conjunto de viviendas a partir de un conjunto de parámetros, como pueden ser la estructura de la vivienda, condiciones climáticas, facturas de electricidad... La demanda de calor se determina en base a la climatología, a las características de la casa y al uso de la calefacción. La demanda de electricidad se calcula en función de los aparatos eléctricos y del comportamiento de los habitantes. Se utilizan métodos estadísticos para averiguar el consumo energético asumiendo que los aparatos son independientes y que se utilizan aleatoriamente. Este segundo modelo proporciona resultados más semejantes con la realidad que el de proporciones.

(Jian et al., 2005) realiza un estudio sobre sistemas distribuidos de generación y gestión de energía basados en energías renovables. Se utilizan varios generadores de energía que aprovechan el viento, la luz solar y la biomasa. La energía se almacena respectivamente en volantes de inercia, en baterías químicas, y en supercondensadores de forma que cada elemento de generación está asociado a uno de almacenamiento. Se constituyen por tanto tres bloques formados por: elemento de generación, elemento de almacenamiento, unidad de control y unidad de carga simulada. El estudio se centra en el bloque formado que aprovecha la energía eólica y la almacena en un volante de inercia. El comportamiento de la turbina de viento a velocidad variable es simulado mediante un motor de inducción que maneja un generador magnético síncrono para



generar electricidad. El generador magnético es quien realiza las conversiones entre energía eléctrica y mecánica. El sistema de almacenamiento está formado por un volante de inercia y un motor de inducción. El motor de inducción se encarga de mover el volante de inercia que realiza las transformaciones energéticas. La unidad de control se encarga de aumentar la velocidad de rotación del volante de inercia cuando la tensión inducida por el generador aumenta, de esta forma se almacena la energía. Y cuando el generador reduce la tensión, el volante de inercia reduce su velocidad entregando la energía al sistema. Los resultados de las simulaciones de este modelo son positivos, por lo que son una alternativa a los sistemas tradicionales centralizados.

La mayoría de los trabajos de gestión de la distribución eléctrica en viviendas está orientada a la gestión de las cargas que mayor consumo tienen, normalmente los sistemas de climatización. Las estrategias de control utilizadas suelen ser sencillas, ya que se apoyan en sistemas de generación renovable o sistemas de almacenamiento. Las principales carencias que presentan es que o bien tienen algoritmos de control orientados a la climatización y que por lo tanto, no es inmediato utilizarlos en otros electrodomésticos, por ejemplo la lavadora, o bien no tienen en cuenta a la comunidad de vecinos, lo que limita la capacidad de respuesta del sistema ante cambios en el entorno.

3.3. Vehículos

Reduciendo el nivel de abstracción se pasa al siguiente nivel a analizar, el de los vehículos.

La industria ferroviaria ha estado utilizando técnicas como la regeneración de la energía durante el frenado desde hace más de 30 años. (Ogasa, 2008) propone el uso de fuentes de energía híbridas, por ejemplo reutilizando la energía que se genera durante la frenada en ferrocarriles eléctricos. El desarrollo de la tecnología ha permitido exportar este tipo de técnicas a vehículos de carretera. Existen diversos tipos de vehículos de carretera: eléctricos, híbridos. Los eléctricos son aquellos que únicamente utilizan electricidad para generar trabajo. Los híbridos pueden utilizar como fuente de energía: combustibles fósiles o electricidad, tanto de forma aislada como combinada. IEEE los define como aquellos que tienen una batería mayor o igual a 4kWh y con una autonomía mayor de 10 millas en modo eléctrico (Green li et al., 2011). El trabajo (Wencong et al., 2012) analiza el impacto



del uso de los vehículos híbridos enchufables en las redes de distribución, bajo los paradigmas vehicle-to-grid (V2G) y grid-to-vehicle (G2V). El artículo concluye que dicho impacto, depende de: los patrones de conducción, los criterios de carga de los vehículos, del tiempo de carga, y de la popularización de este tipo de vehículos. Los sistemas de gestión energética tienen una gran relevancia en vehículos, tanto eléctricos como híbridos, ya que no solo han de ser capaces de realizar optimizaciones teniendo en cuenta un único objetivo y ciertas restricciones, sino que además han de ser capaces de realizar optimizaciones multiobjetivo (minimizar el consumo, minimizar los picos de demanda, minimizar el coste de carga, maximizar el confort de los usuarios,...), optimizaciones dinámicas y optimizaciones predictivas.

A continuación se detallan diversos sistemas de gestión energética que se utilizan en el sector automovilístico aplicado a la recarga mediante conexión a las redes eléctricas.

(Saber and Venayagamoorthy, 2011), (Mitra and Venayagamoorthy, 2010) presenta sistemas de control en tiempo real para redes eléctricas con capacidad de conexión de vehículos híbridos o eléctricos, ya sea V2G o G2V. El primero de ellos hace énfasis en las ventajas del uso V2G, con el fin de utilizar los vehículos como fuente de energía y así reducir las emisiones contaminantes y el coste económico.

(Galus and Andersson, 2008) propone un sistema multiagente para la integración y gestión de la recarga eléctrica para un alto número de vehículos eléctricos o híbridos. La optimización está basada en las variaciones de precio no lineales. La arquitectura está basada en "agentes PHEV" que representan a cada uno de los vehículos; "agente concentrador de energía", que enlaza con los generadores de energía, obteniendo el precio de compra de la energía cada 15 min; "agente concentrador de energía PHEV", que se encarga de determinar el comportamiento del conductor; y por último el "agente gestor PHEV" que es el enlace entre "los agentes PHEV", que quieren recargar, y el "agente concentrador de energía", que representa a los productores. El "agente gestor PHEV" es el que se encarga de realizar la distribución eléctrica en función del precio de compra, el orden de llegada, el estado de carga de la batería y el tiempo de conexión.

Por otro lado, existen sistemas de gestión energética orientados a optimizar el uso energético en los vehículos mientras están en movimiento. En este caso, los



sistemas de gestión energética están en consonancia con los sistemas de obtención de energía, principalmente cuando es renovable.

(Murphey et al., 2012) presenta un framework para el aprendizaje del conocimiento sobre optimización en función del tipo y tráfico de carreteras, que permite predecir situaciones de conducción y así adaptar el consumo energético mediante el uso de la marcha adecuada y de la batería. Dicho trabajo queda completado con (Murphey et al., 2013), en el que establecen 3 tipos de controladores que permite obtener la mejor combinación de uso del motor y de la batería en tiempo real, en función de las predicciones del estado del tráfico y de la carretera.

(Borhan et al., 2012) presenta un modelo de control predictivo aplicable a vehículos híbridos dotados de motor de combustión y eléctrico con el fin de aumentar la autonomía. El sistema de control utiliza una función de coste no lineal para cada tipo de motor con el objetivo de obtener el uso que se debe hacer de cada uno de los motores.

(Thounthong et al., 2009) introduce un sistema de gestión energética que es capaz de utilizar una pila de combustible como sistema de propulsión principal, baterías y supercondensadores. El sistema de control gestiona el uso de la pila de combustible para mantener la batería cargada. También gestiona el uso de la batería para mantener cargados los supercondensadores, que son los que se encargan, en última instancia, de regular la tensión. La gestión se realiza en base a 3 modos: modo de carga, modo de descarga y modo de recuperación. El modo de carga se caracteriza porque la pila de combustible provee energía a las cargas del vehículo y a la batería. El modo de descarga se da cuando la pila de combustible y la batería suministran energía a las cargas del vehículo. El modo de recuperación se da cuando las cargas del vehículo cambian su rol, para suministrar a la batería.

3.4. Robótica móvil

El siguiente nivel de abstracción es la robótica móvil. En este campo la gestión y suministro energético son relevantes ya que dependiendo del escenario para el que están pensados, la autonomía será uno de los principales requerimientos a satisfacer, sobre todo en escenarios en los que no existe intervención humana.



Los trabajos que se muestran a continuación, se engloban en un escenario determinado por la ausencia total de personas y por lo tanto por la ausencia de mantenimiento para el correcto desempeño de sus funcionalidades.

(Huihuan et al., 2010) realiza un estudio de estrategias de gestión de energía para vehículos autónomos eléctricos dotados de 4 motores eléctricos, uno para cada rueda. Se destaca la versatilidad de tener varios motores con los que poder regular el consumo, frente a los sistemas basados en un único motor. La estrategia de gestión se basa en la distribución de potencia entre los 4 motores, ya que según demuestran sus simulaciones el consumo energético de los 4 motores puede ser menor que en el caso de un único motor.

(Ray et al., 2007) presenta un robot autónomo de 4 ruedas, alimentado por placas fotovoltaicas destinado a ser utilizado en campamentos científicos en la Antártida y Groenlandia con capacidad para recorrer más de 500 km transportando un peso de 15 kg. El robot presenta un consumo medio de 160 W que es alimentado por el sol que esas latitudes presenta una elevación de 16°. El robot tiene forma de hexaedro con las 4 ruedas en el plano inferior, estando el resto de planos recubiertos por placas fotovoltaicas. Las placas reciben la insolación con variaciones del ancho de banda de hasta 1 Hz debido a las ondulaciones en el terreno. La energía generada por las placas se utiliza o se almacena en unas baterías minimizando el flujo de energía que entra o sale de las baterías. El trabajo presenta un algoritmo de control fotovoltaico para aprovechar al máximo las condiciones extremas al que es sometido. El algoritmo de control se encarga de gestionar la energía entre dos funcionalidades: movilidad y consumo propio. Cuando no hay energía suficiente el sistema de control reduce la velocidad a la que se mueve el vehículo.

El siguiente escenario está caracterizado por los usuarios finales de este tipo de dispositivos. Los usuarios son personas con diversidad funcional. Ellos son los principales beneficiarios durante su vida diaria de las ventajas que proporciona la tecnología. Por ello, necesitan dispositivos que faciliten su vida diaria y potencien su autonomía. Aunque algunos colectivos puedan realizar algún tipo de mantenimiento en función de sus diversidades funcionales, los dispositivos no deben necesitar mantenimiento alguno, ya que si se necesitara algún mantenimiento habría que diseñar un dispositivo específico para cada colectivo en función de sus diversidades funcionales con las repercusiones que conlleva. La alimentación eléctrica constituye el más básico y universal mantenimiento, ya que



todos necesitan electricidad para desempeñar su función. El caso óptimo está constituido por el dispositivo de ayuda que tiene una alimentación continua y autónoma, ya que no necesita ser conectado a la red eléctrica. Este tipo de dispositivos es especialmente útil para personas con diversidad funcional, aunque para el resto también, este planteamiento es el que se conoce como “diseño para todos”.

(Takahashi and Matsuo, 2011) presentan una silla de ruedas dotada con una pila de combustible, un generador fotovoltaico y una batería. Está dotado de 4 circuitos desde la pila de combustible al motor, del generador fotovoltaico al motor, del generador fotovoltaico a la batería, de la batería al motor. El control está realizado por un microordenador que detecta el estado de cada elemento y decide el elemento suministrador que satisface a cada elemento consumidor.

(Bouquain et al., 2008) propone un modelo y un diseño de una silla de ruedas autónoma dotada de una pila de combustible y de una batería. La pila de combustible actúa como fuente de alimentación principal. El tamaño de la pila está calculado para satisfacer el consumo medio, mientras que la batería es utilizada para suplir los picos de consumo. La conexión entre la pila y la batería se realiza mediante un convertidor DC/DC. La estrategia de control de la pila de combustible depende de la temperatura, de la eliminación de los productos que se van generando y del suministro de hidrógeno y oxígeno.

3.5. Dispositivos electrónicos

Analizados los sistemas de gestión de energía en robótica móvil se pasa a analizar técnicas de reducción de consumo en dispositivos electrónicos. Dichas técnicas pueden ser clasificadas como estáticas o dinámicas (Abbasian et al., 2008). Las estáticas comprenden técnicas basadas en la elección de componentes en tiempo de diseño, como pueden ser: lógica de bajo consumo, diseño físico para ahorrar energía, desarrollo de software optimizado... La elección adecuada de componentes durante el tiempo de diseño es importante a la hora de aumentar la autonomía del sistema, pero no permite explotar las variaciones de carga que sufre el sistema durante su utilización. En estas condiciones es donde las técnicas dinámicas adquieren mayor protagonismo. La gestión del consumo de los componentes, las cargas de trabajo y los controles principalmente como sistemas de eventos discretos (DESS) que permiten pasar de un estado a otro.

Entre las técnicas dinámicas encontramos: el escalado dinámico de voltaje y frecuencia (DVFS) (Kihwan et al., 2005) y gestión dinámica de consumo (DPM) (Dargie, 2012).

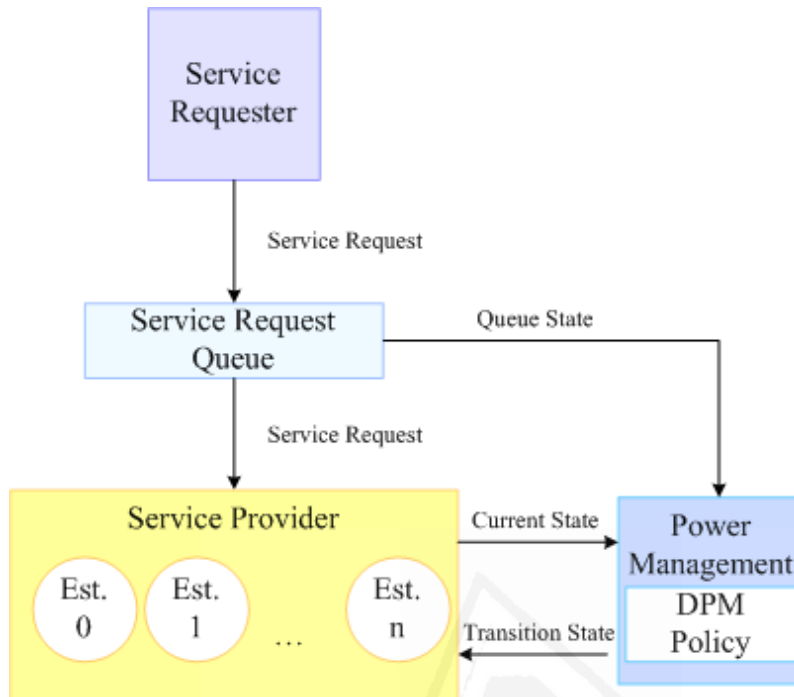


Figura 1.12 Esquema de gestión dinámica de consumo (Rajesh et al., 2003)

La primera de ellas se basa en escalar el nivel de voltaje o frecuencia del procesador o de componentes electrónicos suficientemente como para procesar la carga de trabajo asegurando el cumplimiento de las restricciones temporales. Los procesadores modernos implementan técnicas de la familia DVFS.

(Li and Wu, 2013) describe el uso de técnicas DVFS en plataformas heterogéneas compuestas por multiprocesadores. (Howard et al., 2012) especifica un procesador dotado de 48 núcleos con tecnología CMOS de 45 nm. (Dighe et al., 2010) describe su uso en un procesador dotado de 80 núcleos con tecnología de 65 nm. Además de utilizar las técnicas DVFS en los núcleos que componen los procesadores es posible aplicarlas a la circuitería asociada a los procesadores que no forma parte de los núcleos, tal y como recoge la patente (Sistla et al., 2011). Dicha circuitería incluye memoria cache, el controlador de la memoria caché y la



estructura de interconexión entre núcleos. También es posible aplicar estas políticas a nivel de servidores (Canturk et al., 2013), (Kang et al., 2012).

Las técnicas DVFS y DPM suelen aplicarse de forma independiente,

El trabajo (Bhatti et al., 2010) considera el problema de minimizar el consumo energético en multiprocesadores que son capaces de aplicar técnicas DVFS y DPM. Normalmente este tipo de técnicas se aplican por separado, ya que cada una de ellas es conveniente en distintas condiciones. En cambio, en este trabajo define un sistema híbrido que es capaz aplicar dichas técnicas en función de la carga de trabajo y del estado del entorno.

Las técnicas DPM utilizan un gestor de consumo para ahorrar energía en los dispositivos, para ello reducen el consumo en periodos de inactividad o de baja carga encendiendo y apagando selectivamente componentes (Irani et al., 2005), (Ren et al., 2005). El modelado de estos sistemas se realiza mediante máquinas de estados finitos, que representan los modos de funcionamiento de los componentes, y por eventos que desencadenan las transiciones entre estados (Ren et al., 2005). El comportamiento del sistema es descrito por las funciones de siguiente estado y siguiente evento, que dependerán de la política que tenga implementado (Bogliolo et al., 2004). Estos sistemas están formados generalmente por los siguientes elementos: consumidor del servicio (SR), cola de peticiones (SRQ), proveedor del servicio (SP) y gestor de consumo (PM). El consumidor del servicio realiza peticiones de servicio que se almacenan en la cola de peticiones. El proveedor de servicio se encargará de resolver las peticiones cuando entre en el estado apropiado. El gestor de consumo recibe el estado de la cola de peticiones y el estado actual del proveedor de servicio y en función de la política que tenga implementada lanzará un evento para que se produzca la transición a otro estado. La figura 1.12 ilustra este esquema (Rajesh et al., 2003).

Las técnicas DPM pueden estar basadas en diversas políticas heurísticas, estocásticas y predictivas (Abbasian et al., 2008). Las políticas heurísticas están basadas principalmente en técnicas de tiempo de espera. Se caracterizan por suspender a un componente si está inactivo durante un periodo mayor al tiempo de espera. La determinación del tiempo de espera se puede realizar de forma fija y que no cambie con el tiempo (Karlin et al., 1994) o de forma dinámica. Las políticas heurísticas son sencillas de implementar pero no ofrecen garantías de rendimiento (Gaurav and Tajana Simunic, 2006). Este esquema es ineficiente ya que se malgasta energía mientras que transcurre el tiempo de espera. Las políticas



estocásticas modelan las peticiones y los cambios en el nivel de consumo del dispositivo mediante procesos estocásticos. (Bogliolo et al., 2004) proponen el modelado de las funciones no deterministas mediante distribuciones de probabilidad condicional en la línea de los semi-procesos de Markov (GSMPs). Los planteamientos estocásticos están basados en teorías estadísticas, por lo que presentan problemas en sistemas muy dinámicos. Y por último las políticas predictivas realizan el apagado de componentes cuando se prevé que el periodo de inactividad es suficiente como para amortizar el coste de apagado y encendido. (Abbasian et al., 2008) presenta una política DPM basada en wavelet para predecir los tiempos de inactividad de un proveedor de servicios. Este método es totalmente dinámico ya que después de cada predicción se actualiza con los nuevos valores con el nuevo evento. Estas políticas predictivas presentan problemas similares a las estocásticas.

El trabajo (Dargie, 2012) analiza el uso de técnicas de reducción de consumo en redes de sensores inalámbricos. Las consecuencias de falta de suministro energético en algunos de los sensores, puede ocasionar la pérdida de conectividad del resto de sensores. Las redes de sensores inalámbricos se utilizan para desarrollar aplicaciones en diversos campos: monitorizar comportamiento de animales y plantas; monitorizar la integridad estructural de edificaciones, monitorizar estado de tuberías, actividad sísmica, etc. La energía requerida por los sensores se utiliza principalmente para efectuar comunicaciones inalámbricas y en el propio procesamiento. Con el fin de reducir el consumo energético, se prioriza el uso de protocolos de comunicación energéticamente eficientes y de técnicas DPM, que incluyen el apagado selectivo de componentes cuando no se hace uso de ellos y el escalado dinámico de voltaje y frecuencia. Aunque el escalado de voltaje permite reducir el consumo, solamente se puede escalar hasta cierto punto. El límite de máximo reducción del voltaje para la tecnología CMOS, sin que afecte a la estabilidad de los transistores, está determinado por (Swanson and Meindl, 1972).

Universidad de Alicante



4. Formulación del problema

Dada la envergadura del problema abordado, es conveniente formalizar los elementos constituyentes de las redes de interconexión de los nodos que permiten la generación, almacenamiento, transporte y consumo de electricidad. La naturaleza distribuida y conexas de dichos sistemas hace idónea la utilización de la teoría de conjuntos y de grafos como punto de partida para formalizar el problema a tratar.

Es importante analizar formulaciones que sean capaces de expresar las particularidades de estos sistemas de forma robusta y condensada. En esta línea el trabajo (Mingyang et al., 2008) propone una formulación de flujo de energía continua óptima para sistemas con una topología dinámica. El sistema está caracterizado por buses y líneas. Los buses son recursos de generación de electricidad o elementos de consumo o cargas. En cambio las líneas son las conexiones entre los buses, teniendo en cuenta que entre cada dos buses únicamente puede existir una línea. La topología se representa mediante una matriz de incidencia donde las filas representan las líneas y las columnas a los buses. El valor de cada elemento será 1 en la columna del bus origen de la electricidad de dicha línea. Será -1 en la columna del bus destino del flujo de electricidad. Y 0 en las columnas de buses que no estén conectados a la línea. Este método de reflejar la información resulta especialmente útil a la hora de realizar cálculos computacionales, ya que la información está almacenada en una matriz cuyo tamaño es directamente proporcional al número de nodos de la red.

La formulación del problema, se presenta como una variación de la esbozada anteriormente. Se define un sistema energético, SE, como una tripleta formada por: un conjunto finito de nodos capaces de manipular electricidad, N, una matriz de adyacencia, A, que muestra la capacidad de transportar electricidad entre los nodos, y una matriz de requerimientos, R, que muestra los requerimientos eléctricos de cada nodo a lo largo del tiempo.

$$SE \equiv \langle N, A, R \rangle \quad 1.1$$

El conjunto N es un conjunto finito de nodos, n_i , cuyo cardinal es I y representa a los nodos capaces de utilizar electricidad ya sea generándola o bien consumiéndola. Esto se muestra en la ecuación 1.2.



$$N \equiv \{n_i / i = 1..l\} \quad 1.2$$

$$|N| = l$$

A su vez, cada uno de los nodos, n_i , está determinado por un número finito de parámetros que representan las características reales y el comportamiento de dicho componente eléctrico, ver ecuación 1.3. Sin embargo, de momento no se van a especificar los parámetros, que definen a cada uno de los nodos, sino que esta tarea se llevará a un mayor nivel de detalle en el capítulo tercero.

$$n_i \equiv \langle p_0, p_1, \dots, p_m \rangle \quad 1.3$$

La matriz de adyacencia no binaria, A , define las relaciones entre cada pareja de nodos, ij . El valor del componente A_{ij} nulo representa que no existe posibilidad de transporte eléctrico desde el nodo n_i hasta el n_j , en el caso de un valor no nulo, indica la viabilidad del transporte eléctrico, subordinado a la restricción de que la potencia nominal transportada sea menor o igual que el valor de A_{ij} . La matriz de adyacencia se puede observar en la ecuación 1.4.

$$A := (A_{i,j})_{n \times n} \quad 1.4$$

$$A_{ij} := \begin{cases} 0, & \text{si } \nexists \text{ relación} \\ k \geq 0, & \text{si } \exists \text{ posibilidad de transporte: } k \in \mathbb{R} \end{cases}$$

La matriz de requerimientos representa las necesidades de energía de cada uno de los elementos a lo largo del tiempo. Se pretende ilustrar tanto la capacidad de generación como de consumo de electricidad a lo largo del tiempo. Las filas de la matriz R , representan a cada uno de los nodos y las columnas hacen referencia al instante de tiempo. Esto se muestra en la ecuación 1.5.

$$R := (R_{i,z})_{n \times t} \quad 1.5$$

$$R_{iz} := \begin{cases} q > 0, & \text{si genera electricidad en el instante } z \\ q < 0, & \text{si consume electricidad en el instante } z \end{cases}$$

Se puede observar, en la figura 1.13, la formulación asociada a un posible grafo que define un sistema eléctrico compuesto por 10 nodos capaces de manipular electricidad y por y por otras 10 líneas de conexión entre ellos, que permite el transporte de electricidad en el caso de que se decida direccionar la electricidad por dicho camino.

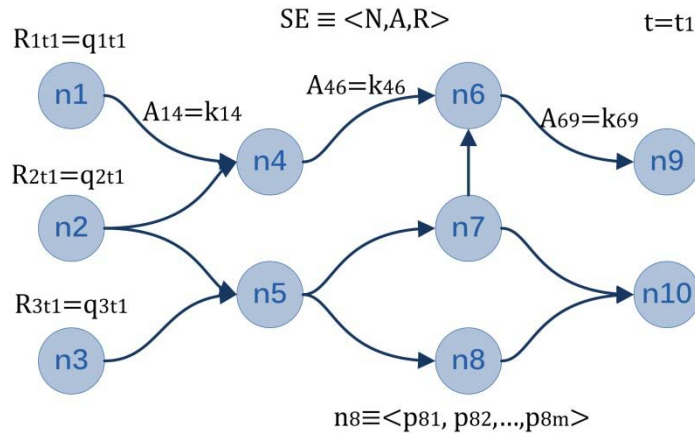


Figura 1.13 Nomenclatura asociada a la representación de un sistema eléctrico mediante un grafo

4.1. Propuesta de solución

La gestión de la distribución eléctrica en una red compuesta por nodos de distinta naturaleza es una tarea compleja ya que presentan distintas necesidades, en ocasiones opuestas, por lo que alcanzar una solución que satisfaga a todos no es una tarea sencilla. La naturaleza y las características propias de cada sistema eléctrico determinan las estrategias, técnicas y soluciones empleadas para gestionar la distribución eléctrica. Las soluciones ad-hoc evidencian la ausencia de soluciones genéricas, flexibles, escalables, modulares y dinámicas con potencia suficiente para ser válidas en los diversos ámbitos y contextos que se puedan presentar.

Por tanto, la solución propuesta tiene como base la universalidad para abarcar un amplio conjunto de problemas. Concretamente, ha de reunir las siguientes características con el fin de alcanzar los objetivos previamente definidos:

- Genérica: ha de ser suficientemente abstracta para poder ser particularizada independientemente de la naturaleza y contexto del sistema eléctrico.
- Flexible: debe proporcionar los mecanismos para configurar y calibrar la solución particular a un sistema eléctrico de forma que se puedan aprovechar



las propiedades intrínsecas no tenidas en cuenta debido al proceso de abstracción.

- Escalable: la variabilidad de la talla de los problemas a solucionar requiere soluciones capaces de afrontar desde sistemas eléctricos compuestos por varios nodos hasta grandes sistemas formados por miles de nodos sin acusar un deterioro significativo del rendimiento.
- Dinámica: ha de ser capaz de reaccionar rápidamente frente a cambios en las necesidades de consumo energético y de generación.
- Tolerante a fallos: debe ser capaz de afrontar fallos en los componentes integrantes del sistema eléctrico.
- Sostenible: debe fomentar el uso de las fuentes de energía renovable que minimicen el impacto medioambiental.
- Calidad de servicio: ha de garantizar un mínimo de suministro eléctrico a los centros de consumo, cuyo valor estará influenciado por la naturaleza del centro de consumo.
- Activa: ante situaciones de falta de energía suficiente para la demanda energética, se han priorizar los requerimientos energéticos de los centros de consumo, por lo que debe ser capaz de indicar que no hay suficiente energía y que por tanto ha de reducir sus necesidades energéticas apagando selectivamente componentes no críticos de forma semiautónoma.

El sistema gestor de la distribución eléctrica se puede concebir de forma centralizada, en una única estación de computación o distribuida en multitud de nodos de computación interconectados. Ambas arquitecturas presentan ventajas y desventajas en distintos aspectos, aunque teniendo en cuenta la naturaleza de los sistemas eléctricos y los requerimientos en cuanto a escalabilidad, flexibilidad, modularidad, tolerancia a fallos, y rendimiento es conveniente orientar la propuesta hacia soluciones distribuidas, concretamente hacia el paradigma de computación basado en sistemas multiagente. Por ello, es menester refinar el concepto de nodo utilizado en la formulación del problema para pasar al concepto de agente y consecuentemente con el de sistema multiagente (Jennings et al., 1998). Las definiciones y la terminología relacionada con los agentes son abordadas en los siguientes capítulos.

Se propone una metodología para el modelado y prototipado de sistemas de gestión de la distribución eléctrica que abarca un modelo de sistema multiagente y una estrategia de optimización de la distribución de energía eléctrica genérica que es capaz de gestionar cargas.



La propuesta está en consonancia con los principios que postulan las arquitecturas dirigidas por modelos, MDA, (Mellor et al., 2004) donde se parte de un modelo independiente de la plataforma a partir del cual se obtiene un modelo dependiente de la plataforma middleware y seguidamente, se instancia la arquitectura a partir de la representación del problema a solucionar utilizando dicho modelo. Dentro del dominio que nos ocupa, a partir del modelo dependiente, que contiene los distintos tipos de agentes que se pueden dar en una instalación eléctrica, se particulariza el modelo de acuerdo a las características de la instalación eléctrica. Se obtiene una instancia del modelo dependiente, en este caso un sistema multiagente, que representa el sistema gestor de la distribución eléctrica para la instalación eléctrica a gestionar de forma óptima.

El primer nivel de abstracción de la propuesta se puede ver en la figura 1.14 donde se muestra la metodología MDA que se propone. En primer lugar se pueden observar dos etapas, necesariamente no diferenciadas, ya que la naturaleza de las subetapas que las componen hace que la línea que las separa sea difusa.

La etapa de *modelado* consiste en realizar el proceso de abstracción de los distintos tipos de instalaciones eléctricas existentes y de los componentes que las constituyen con el fin de crear un modelo formal basado en agentes, e independiente de la plataforma, capaz de representar a cualquier tipo de instalación eléctrica. Internamente se pueden diferenciar tres secciones. La primera, en la que predomina el *análisis* de las instalaciones eléctricas a modelar, tiene el cometido de obtener el modelo funcional que recoge la información de alto nivel. La segunda, en la que tiene mayor peso el *diseño*, se encarga de definir la organización del modelo independiente, denominado modelo estructural. La tercera está enfocada principalmente al *desarrollo* del modelo dependiente de la tecnología a partir del modelo independiente. El modelo dependiente, denominado tecnológico, al estar desarrollado de acuerdo a una tecnología concreta es únicamente válido para dicha tecnología, por lo que si se quiere utilizar otra tecnología alternativa se debe desarrollar otro modelo tecnológico alternativo. En este caso, la elección de una tecnología concreta está orientada a la elección de una plataforma para el desarrollo de sistemas multiagente.

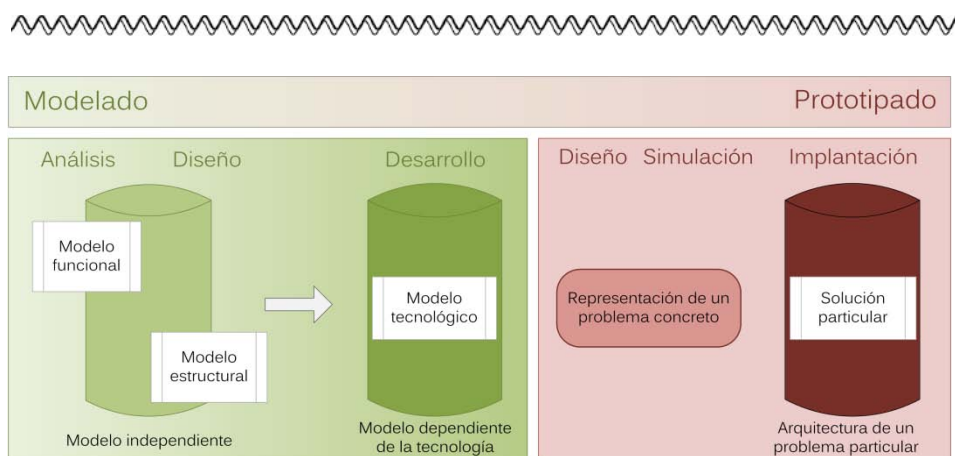


Figura 1.14 Nivel general de la metodología para el modelado y prototipado de sistemas de gestión de la distribución eléctrica basada en arquitecturas dirigidas por modelos

La etapa de *prototipado* permite obtener sistemas de gestión de la distribución eléctrica a partir del modelo tecnológico obtenido durante el modelado. A su vez, está compuesta por tres subetapas. La primera denominada subetapa de *diseño* permite crear instancias del modelo tecnológico que representan a un problema concreto, en este caso instalación eléctrica. La instancia del modelo tecnológico es un sistema multiagente que actúa como sistema gestor de la distribución eléctrica para la instalación eléctrica instanciada. Seguidamente, la subetapa de *simulación* permite determinar el comportamiento y estimar la bondad de la solución obtenida y así poder modificar el valor de algunos parámetros hasta que la solución obtenida sea satisfactoria. La subetapa de *implantación* permite integrar la solución obtenida, en este caso un sistema multiagente ad-hoc para la instalación eléctrica a gestionar.

Aunque la metodología es detallada desde el siguiente capítulo hasta el quinto, la figura 1.15 esboza a cada una de las entidades que aparecen en la metodología. El modelo funcional recoge información acerca de las clases de agentes, de los roles que implementan y de los objetivos que persiguen. El modelo estructural muestra la organización interna de los agentes, es decir el modelo de agente, y la estructura externa, que refleja las relaciones de interacción entre las distintas clases de agentes. Por su parte, el modelo tecnológico, que contiene el desarrollo para un determinado framework de sistemas multiagente, es a su vez un framework para el desarrollo de sistemas multiagente de distribución eléctrica (SMADE). Dentro de la etapa de *prototipado* la representación de sistemas eléctricos particulares se realiza mediante un entorno de prototipado que permite



crear de forma semiautomática el prototipo SMADE que puede ser integrado en una instalación real.

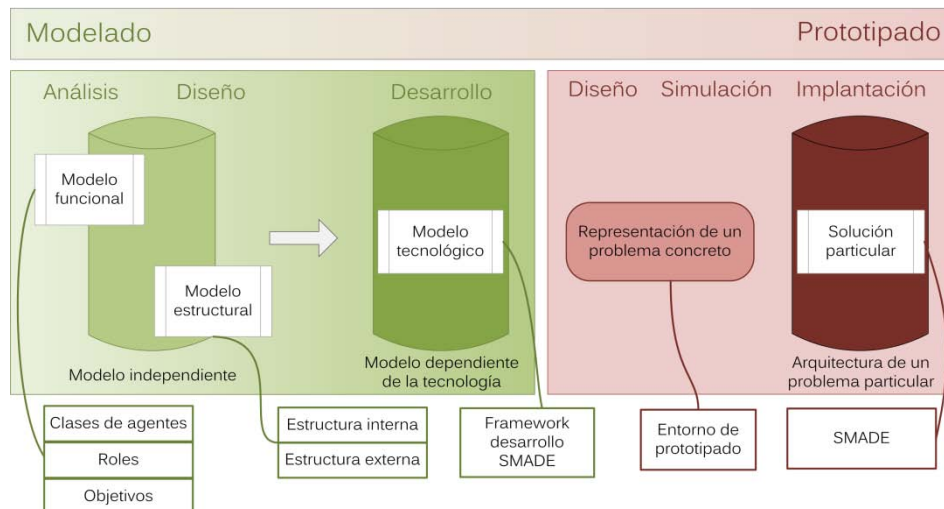


Figura 1.15 Contenido de los modelos funcional, estructural y tecnológico, así como del resto de entidades que conforman la metodología

El siguiente nivel de detalle lo ilustra la figura 1.16, describiendo a más bajo nivel las tareas que definen el entorno de prototipado. La etapa de *diseño* hace referencia a representar la instalación eléctrica, que se quiere gestionar, utilizando el modelo dependiente de la plataforma, que previamente ha sido obtenido del independiente. En primer lugar se han de añadir los agentes necesarios para representar la instalación eléctrica, así como las conexiones eléctricas entre ellos y por último se ha de determinar el valor de los parámetros que definen a cada agente. Una vez representada la instalación eléctrica se pasa a la etapa de *simulación*, donde se simulan para cada unidad de tiempo, tanto los requerimientos energéticos de los centros de consumo, como la capacidad de generación eléctrica. Llegados a este punto, es posible realizar la planificación de la distribución durante dicho intervalo de tiempo. La planificación obtenida se puede almacenar y evaluar con el fin de obtener la bondad de la solución obtenida. En el caso de que la evaluación no sea satisfactoria, se puede volver a la etapa de *diseño* para modificar el valor de algunos parámetros relacionados con las políticas de distribución y lanzar la simulación nuevamente hasta obtener una evaluación positiva. La etapa de *implantación* consiste en generar la arquitectura



de la instalación representada para el framework de sistemas multiagente en el que vaya a ser integrada.

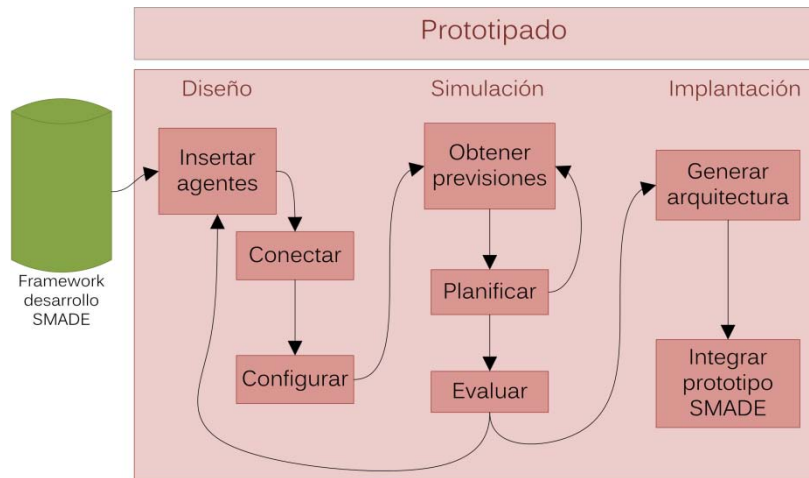


Figura 1.16 Diagrama de bloques con las tareas que definen el entorno de prototipado

La tarea *planificar* es de especial importancia, ya que es una de las que aporta inteligencia al sistema, ya que se encarga de obtener la distribución eléctrica a partir de los requerimientos energéticos de los centros de consumo y de la energía disponible para cada unidad de tiempo. La optimización de la planificación es una tarea que puede llegar a requerir grandes recursos computacionales, por lo que una solución distribuida permite abordar este tipo de problemas de forma razonable. La naturaleza distribuida de los agentes permite obtener la distribución de la energía eléctrica cercana a la óptima de acuerdo a unos criterios de optimización en base a dos fases. La primera fase es totalmente distribuida y se encarga de buscar una solución a través de protocolos de negociación entre los agentes. A su vez, estos protocolos están compuestos por dos grupos de interacciones. Las primeras se encargan de gestionar el suministro, de forma que se procura suministrar la electricidad requerida por las cargas. En el caso de que esto no sea suficiente o se de alguna situación potencialmente crítica se puede realizar lo que se denomina gestión de cargas, para reducir la demanda energética en determinados momentos. De esta forma, se trata de anticiparse a las situaciones críticas, dotando la solución de carácter proactivo. La segunda fase, que es centralizada y no necesaria, es llevada a cabo en situaciones en las que la solución obtenida en la primera fase no sea suficientemente satisfactoria,



por lo que uno de los agentes se encarga de refinar dicha solución de forma iterativa mientras haya tiempo disponible.

A nivel general, se define la función de planificación de la distribución eléctrica, $\lambda(SE)_1^t$, durante un periodo de tiempo determinado entre los agentes en función de sus respectivos requerimientos. Posteriormente, en el capítulo cuarto se profundiza en dicha función de planificación cuya primera fase es distribuida y la segunda centralizada.

$$\lambda_1^t: SE \rightarrow (\mathbb{R})_{n \times n \times t}$$

$$\lambda(SE)_1^t := (\lambda_{i,j,z})_{n \times n \times t}$$

1.6

$$\lambda_{ijz} := \begin{cases} r > 0, & \text{si el agente } i \text{ genera energía } r \text{ en el instante } z \\ r < 0, & \text{si el agente } i \text{ consume energía } r \text{ en el instante } z \end{cases}$$

El resultado de esta función dentro de un periodo de tiempo, es la matriz de adyacencia no binaria tridimensional, λ , donde las dos primeras dimensiones hacen referencia al agente origen y al destino respectivamente y la tercera dimensión representa el instante de tiempo. El valor del componente P_{ijz} representa la electricidad aportada desde el agente i , hasta el j en el instante z . De esta forma, las dos primeras soluciones representan la distribución de la electricidad en el sistema en un instante determinado, por lo que la tercera dimensión permite observar la evolución a lo largo del tiempo. Tal y como se muestra en la ecuación 1.6.

Resulta de especial atención la tarea *evaluar*, definida formalmente en la ecuación 1.7, ya que permite cuantificar la idoneidad de la planificación obtenida por la función $\lambda(SE)_1^t$, y por tanto establecer una relación de orden entre distintas planificaciones, λ , en función de diversos criterios de evaluación definidos como el conjunto, τ_{cri} , formado por los siguientes criterios: ecológico, donde se valora la utilización de fuentes de energía renovables; económico donde se premia el uso de energía que menor coste económico presente; satisfacción que persigue la disponibilidad energética para todos los centros de consumo; racional que premia un consumo global constante a lo largo del tiempo. Se define la función de evaluación, $\tau(\lambda \times \tau_{cri}^p)_1^t$, que recibe como argumentos la matriz tridimensional, λ , que contiene la planificación obtenida por la función de planificación, y un subconjunto ordenado por prioridad de criterios de evaluación, τ_{cri}^p , a tener en



cuenta a la hora de valorar la idoneidad de la planificaci3n. El resultado de la funci3n de evaluaci3n es un n3mero real, τ_λ , normalizado entre 0 y 1.

$$\tau_{cri} \equiv \{\tau_{cri_i} / i = 1..4\}$$

$$\tau_1^t: \lambda \times \tau_{cri} \times \tau_{cri} \times \dots \times \tau_{cri} \rightarrow \mathbb{R} \quad 1.7$$

$$\tau(\lambda, \tau_{cri}^p)_1^t \leftrightarrow \tau_\lambda / \tau_\lambda \in [0,1] \wedge p \leq |\tau_{cri}|$$



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Referencias

- (Abbasian et al., 2008) Abbasian, A., Hatami, S., Afzali-Kusha, A. and Pedram, M. (2008) Wavelet-based dynamic power management for nonstationary service requests. *ACM Trans. Des. Autom. Electron. Syst.*, 13, 1-41.
- (Abou et al., 2010) Abou, A. A., Allam, S. M. and Shatla, M. M. (2010) Maximal optimal benefits of distributed generation using genetic algorithms. *Electric Power Systems Research*, 80, 869-877.
- (AlRashidi and El-Hawary, 2009) AlRashidi, M. R. and El-Hawary, M. E. (2009) A Survey of Particle Swarm Optimization Applications in Electric Power Systems. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 13, 913-918.
- (Amundsen and Bergman, 2006) Amundsen, E. S. and Bergman, L. (2006) Why has the Nordic electricity market worked so well? *Utilities Policy*, 14, 148-157.
- (Arteconi et al., 2013) Arteconi, A., Hewitt, N. J. and Polonara, F. (2013) Domestic demand-side management (DSM): Role of heat pumps and thermal energy storage (TES) systems. *Applied Thermal Engineering*, 51, 155-165.
- (Avila-Rosales et al., 2009) Avila-Rosales, R., Rice, M. J., Giri, J., Beard, L. and Galvan, F. (2009) Recent experience with a hybrid SCADA/PMU on-line state estimator. *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE.*



- (Aydinalp-Koksal and Ugursal, 2008) Aydinalp-Koksal, M. and Ugursal, V. I. (2008) Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector. *Applied Energy*, 85, 271-296.
- (Aydinalp et al., 2003) Aydinalp, M., Ugursal, V. I. and Fung, A. S. (2003) Modelling of residential energy consumption at the national level. *International Journal of Energy Research*, 27, 441-453.
- (Bevrani et al., 2008) Bevrani, H., Hiyama, T. and Mitani, Y. (2008) Power system dynamic stability and voltage regulation enhancement using an optimal gain vector. *Control Engineering Practice*, 16, 1109-1119.
- (Bhatti et al., 2010) Bhatti, K., Belleudy, C. and Auguin, M. (2010) Power Management in Real Time Embedded Systems through Online and Adaptive Interplay of DPM and DVFS Policies. *Embedded and Ubiquitous Computing (EUC), 2010 IEEE/IFIP 8th International Conference on*.
- (Bogliolo et al., 2004) Bogliolo, A., Benini, L., Lattanzi, E. and De Micheli, G. (2004) Specification and analysis of power-managed systems. *Proceedings of the IEEE*, 92, 1308-1346.
- (Borhan et al., 2012) Borhan, H., Vahidi, A., Phillips, A. M., Kuang, M. L., Kolmanovsky, I. V. and Di Cairano, S. (2012) MPC-Based Energy Management of a Power-Split Hybrid Electric Vehicle. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 20, 593-603.
- (Bouquain et al., 2008) Bouquain, D., Blunier, B. and Miraoui, A. (2008) A hybrid fuel cell/battery wheelchair; modeling, simulation and experimentation. *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*.
- (BP, 2013) BP (2013) BP Statistical Review of World Energy June 2013. British Petroleum.



- (Brundtland and Khalid, 1987) Brundtland, G. H. and Khalid, M. (1987) Our common future. Brundtland Commission (WCED) report. World Commission on Environment and Development.
- (Calderaro et al., 2011) Calderaro, V., Hadjicostis, C. N., Piccolo, A. and Siano, P. (2011) Failure Identification in Smart Grids Based on Petri Net Modeling. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 58, 4613-4623.
- (Canturk et al., 2013) Canturk, I., Suzanne, M., Jeffrey, K., Rajarshi, D., James, H., Scott, P., Robert, W., Thomas, B., Robert, K., Allen, N., James, N., Abdoulaye, T. and Michael, F. (2013) Agile, efficient virtualization power management with low-latency server power states. *SIGARCH Comput. Archit. News*, 41, 96-107.
- (Ciarretaa et al., 2012) Ciarretaa, A., Espinosa, M. P. and Pizarro-Irizar, C. (2012) The Effect of Renewable Energy in the Spanish Electricity Market. *12 th International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems Lecture Notes in Information Technology*, Vol.9.
- (CNE, 2013) CNE (2013) Comisión nacional de la energía www.cne.es Last access on 22/8/2013.
- (Colson et al., 2009) Colson, C. M., Nehrir, M. H. and Wang, C. (2009) Ant colony optimization for microgrid multi-objective power management. *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES*.
- (Christie et al., 2000) Christie, R. D., Wollenberg, B. F. and Wangensteen, I. (2000) Transmission management in the deregulated environment. *Proceedings of the IEEE*, 88, 170-195.
- (Chunhui et al., 2012) Chunhui, G., Baochen, J., Hao, Y., Zhiqiang, Y., Li, W. and Shangping, R. (2012) Performance Comparisons of Parallel Power Flow Solvers on GPU System. *Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), 2012 IEEE 18th International Conference on*.



(Dargie, 2012) Dargie, W. (2012) Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks: State-of-the-Art. *Sensors Journal, IEEE*, 12, 1518-1528.

(De La Ree et al., 2010) De La Ree, J., Centeno, V., Thorp, J. S. and Phadke, A. G. (2010) Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1, 20-27.

(de Souza and de Almeida, 2010) de Souza, B. A. and de Almeida, A. M. F. (2010) Multiobjective Optimization and Fuzzy Logic Applied to Planning of the Volt/Var Problem in Distributions Systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 25, 1274-1281.

(DG CLIMA, 2013) DG CLIMA, E. (2013) Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2011 and inventory report 2013. *Sustainable development indicators*. European Commission, DG Climate Action European Environment Agency.

(Dighe et al., 2010) Dighe, S., Vangal, S., Aseron, P., Kumar, S., Jacob, T., Bowman, K., Howard, J., Tschanz, J., Erraguntla, V., Borkar, N., De, V. and Borkar, S. (2010) Within-die variation-aware dynamic-voltage-frequency scaling core mapping and thread hopping for an 80-core processor. *Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2010 IEEE International*.

(Dincer and Rosen, 2007) Dincer, I. and Rosen, M. A. (2007) Exergy, environment and sustainable development. *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development*. Amsterdam, Elsevier.

(Dunlap, 1997) Dunlap, R. A. (1997) *The golden ratio and Fibonacci numbers*, Singapore, World Scientific Publishing Co. 9810232640.

(Dyer, 2002) Dyer, C. K. (2002) Fuel cells for portable applications. *Fuel Cells Bulletin*, 2002, 8-9.

(Ebata et al., 2000) Ebata, Y., Hayashi, H., Hasegawa, Y., Komatsu, S. and Suzuki, K. (2000) Development of the Intranet-based SCADA (supervisory control and



- data acquisition system) for power system. *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE.*
- (El-Zonkoly, 2011) El-Zonkoly, A. M. (2011) Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1, 50-59.
- (European Commission, 2011) European Commission (2011) Energy Research in the 7th framework programme <http://cordis.europa.eu/fp7/energy/> Last access on 27/04/2011.
- (EUROSTAT, 2012) EUROSTAT (2012) Electricity production and supply statistics. European Commission.
- (Falaghi et al., 2009) Falaghi, H., Haghifam, M. and Singh, C. (2009) Ant Colony Optimization-Based Method for Placement of Sectionalizing Switches in Distribution Networks Using a Fuzzy Multiobjective Approach. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 24, 268-276.
- (Franco et al., 2012) Franco, J., Lavorato, M., Rider, M. J. and Romero, R. (2012) An efficient implementation of tabu search in feeder reconfiguration of distribution systems. *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE.*
- (Furió and Meneu, 2010) Furió, D. and Meneu, V. (2010) Expectations and forward risk premium in the Spanish deregulated power market. *Energy Policy*, 38, 784-793.
- (Galus and Andersson, 2008) Galus, M. D. and Andersson, G. (2008) Demand Management of Grid Connected Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEV). *Energy 2030 Conference, 2008. ENERGY 2008. IEEE.*
- (Gaurav and Tajana Simunic, 2006) Gaurav, D. and Tajana Simunic, R. (2006) Dynamic power management using machine learning. *Proceedings of the*



2006 IEEE/ACM international conference on Computer-aided design. San Jose, California, ACM.

- (Golestani and Tadayon, 2011) Golestani, S. and Tadayon, M. (2011) Distributed generation dispatch optimization by artificial neural network trained by particle swarm optimization algorithm. *Energy Market (EEM), 2011 8th International Conference on the European*.
- (Goodland and Daly, 1996) Goodland, R. and Daly, H. (1996) Environmental Sustainability: Universal and Non-Negotiable. *Ecological Applications*, 6, 1002-1017.
- (Gram-Hanssen, 2010) Gram-Hanssen, K. (2010) Standby Consumption in Households Analyzed With a Practice Theory Approach. *Journal of Industrial Ecology*, 14, 150-165.
- (Green li et al., 2011) Green li, R. C., Wang, L. and Alam, M. (2011) The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 544-553.
- (Gutierrez-Martinez et al., 2011) Gutierrez-Martinez, V. J., Cañizares, C. A., Fuerte-Esquivel, C. R., Pizano-Martinez, A. and Xueping, G. (2011) Neural-Network Security-Boundary Constrained Optimal Power Flow. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 26, 63-72.
- (Hong et al., 2012) Hong, J., Johnstone, C., Torriti, J. and Leach, M. (2012) Discrete demand side control performance under dynamic building simulation: A heat pump application. *Renewable Energy*, 39, 85-95.
- (Howard et al., 2012) Howard, J., Dighe, S., Hoskote, Y., Vangal, S., Finan, D., Ruhl, G., Jenkins, D., Wilson, H., Borkar, N., Schrom, G., Paillet, F., Jain, S., Jacob, T., Yada, S., Marella, S., Salihundam, P., Erraguntla, V., Konow, M., Riepen, M., Droege, G., Lindemann, J., Gries, M., Apel, T., Henriss, K., Lund-Larsen, T., Steibl, S., Borkar, S., De, V., Van der Wijngaart, R. and Mattson, T. (2012) A 48-Core IA-32 message-passing processor with DVFS in 45nm CMOS.



Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2010 IEEE International.

- (Huihuan et al., 2010) Huihuan, Q., Guoqing, X., Jingyu, Y., Tin Lun, L., Yangsheng, X. and Kun, X. (2010) Energy management for four-wheel independent driving vehicle. *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on.*
- (Huneault and Galiana, 1991) Huneault, M. and Galiana, F. D. (1991) A survey of the optimal power flow literature. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 6, 762-770.
- (IEA, 2005) IEA (2005) Cambio climático, energía limpia y desarrollo sostenible. Programa de la AIE "G8 de Glenagles". Genagles, International Energy Agency.
- (IEA, 2012) IEA (2012) Key World Energy Statistics 2012. International Energy Agency.
- (Iglesias and Gálvez, 2010) Iglesias, A. and Gálvez, A. (2010) Computational Analysis of a Power Distribution System with Petri Nets. IN Kim, T.-h., Lee, Y.-h., Kang, B.-H. and Slezak, D. (Eds.) *Future Generation Information Technology*. Springer Berlin Heidelberg.
- (Irani et al., 2005) Irani, S., Singh, G., Shukla, S. K. and Gupta, R. K. (2005) An overview of the competitive and adversarial approaches to designing dynamic power management strategies. *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on*, 13, 1349-1361.
- (Jennings et al., 1998) Jennings, N. R., Sycara, K. and Wooldridge, M. (1998) A Roadmap of Agent Research and Development. *Int. Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1, 7-38.
- (Jevons, 1866) Jevons, W. S. (1866) *The Coal Question*, London: Macmillan and Co.



- (Jian et al., 2005) Jian, W., Longyun, K., Binggang, C. and Liuchen, C. (2005) Reliability study of a distributed generation system based on renewable energy. *Electrical and Computer Engineering, 2005. Canadian Conference on*.
- (Kang et al., 2012) Kang, D.-o., Jung, J., Kim, D., Lee, H. and Bae, C. (2012) An Analysis on Personalization Technologies of Policy Based Dynamic Power Management of a Server System. IN Park, J. J., Jin, Q., Sang-soo Yeo, M. and Hu, B. (Eds.) *Human Centric Technology and Service in Smart Space*. Springer Netherlands.
- (Karlín et al., 1994) Karlín, A. R., Manasse, M. S., McGeoch, L. A. and Owicki, S. (1994) Competitive randomized algorithms for nonuniform problems. *Algorithmica*, 11, 542-571.
- (Kihwan et al., 2005) Kihwan, C., Soma, R. and Pedram, M. (2005) Fine-grained dynamic voltage and frequency scaling for precise energy and performance tradeoff based on the ratio of off-chip access to on-chip computation times. *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, 24, 18-28.
- (Kim et al., 2012) Kim, H., Lee, S. K., Kim, H. and Kim, H. (2012) Implementing home energy management system with UPnP and mobile applications. *Computer Communications*, 36, 51-62.
- (Kim et al., 2008) Kim, M., Hur, D. and Park, J. K. (2008) Determination of available transfer capability using multi-objective contingency constrained optimal power flow with post-contingency corrective rescheduling. *Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik)*, 90, 243-253.
- (Körner, 2003) Körner, C. (2003) Slow in, Rapid out--Carbon Flux Studies and Kyoto Targets. *Science*, 300, 1242-1243.



- (Kothari, 2012) Kothari, D. P. (2012) Power system optimization. *Computational Intelligence and Signal Processing (CISP), 2012 2nd National Conference on*.
- (Kumar et al., 2005) Kumar, A., Srivastava, S. C. and Singh, S. N. (2005) Congestion management in competitive power market: A bibliographical survey. *Electric Power Systems Research, 76*, 153-164.
- (Lagorse et al., 2010) Lagorse, J., Paire, D. and Miraoui, A. (2010) A multi-agent system for energy management of distributed power sources. *Renewable Energy, 35*, 174-182.
- (Li and Wu, 2013) Li, D. and Wu, J. (2013) Scheduling on Heterogeneous DVFS Multiprocessor Platforms. *Energy-aware Scheduling on Multiprocessor Platforms*. Springer New York.
- (Li et al., 2007) Li, J., Poulton, G. and James, G. (2007) Agent-Based Distributed Energy Management. IN Orgun, M. and Thornton, J. (Eds.) *AI 2007: Advances in Artificial Intelligence*. Springer Berlin Heidelberg.
- (Lozano et al., 2012) Lozano, C. A., Castro, F. and Ramírez, S. (2012) Unidades de Medición de Fasorial (PMU). *El hombre y la Máquina* 38.
- (Lucia and Gervino, 2006) Lucia, U. and Gervino, G. (2006) Thermo-economic analysis of an irreversible Stirling heat pump cycle. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems, 50*, 367-369.
- (McArthur et al., 2007) McArthur, S. D. J., Davidson, E. M., Catterson, V. M., Dimeas, A. L., Hatziargyriou, N. D., Ponci, F. and Funabashi, T. (2007) Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications; Part I: Concepts, Approaches, and Technical Challenges. *Power Systems, IEEE Transactions on, 22*, 1743-1752.



- (Mellor et al., 2004) Mellor, S. J., Scott, K., Uhl, A. and Weise, D. (2004) *MDA Distilled: Principles of Model-Driven Architecture*, Addison Wesley. 0-201-78891-8
- (Men-Shen and Fu-Yuan, 2010) Men-Shen, T. and Fu-Yuan, H. (2010) Application of Grey Correlation Analysis in Evolutionary Programming for Distribution System Feeder Reconfiguration. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 25, 1126-1133.
- (Merdan et al., 2013) Merdan, M., Prostejovsky, A., Hegny, I., Lepuschitz, W., Andr n, F. and Strasser, T. (2013) Power Distribution Control Using Multi-Agent Systems. IN Sen Gupta, G., Bailey, D., Demidenko, S. and Carnegie, D. (Eds.) *Recent Advances in Robotics and Automation*. Springer Berlin Heidelberg.
- (Messalti et al., 2012) Messalti, S., Belkhiat, S., Saadate, S. and Flieller, D. (2012) A new approach for load flow analysis of integrated AC–DC power systems using sequential modified Gauss–Seidel methods. *European Transactions on Electrical Power*, 22, 421-432.
- (Migueluez et al., 2004) Migueluez, E. L., Rodriguez, L. R., Roman, T. G. S., Cerezo, F. M. E., Fernandez, M. I. N., Lafarga, R. C. and Camino, G. L. (2004) A practical approach to solve power system constraints with application to the Spanish electricity market. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 19, 2029-2037.
- (Min et al., 2002) Min, Z., Panda, R. V., Sapatnekar, S. S. and Blaauw, D. (2002) Hierarchical analysis of power distribution networks. *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, 21, 159-168.
- (Mingyang et al., 2008) Mingyang, L., Qianchuan, Z. and Luh, P. B. (2008) DC power flow in systems with dynamic topology. *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*.



- (Mitra and Venayagamoorthy, 2010) Mitra, P. and Venayagamoorthy, G. K. (2010) Wide area control for improving stability of a power system with plug-in electric vehicles. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 4, 1151-1163.
- (Moradi and Abedini, 2012) Moradi, M. H. and Abedini, M. (2012) A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 34, 66-74.
- (Murphey et al., 2013) Murphey, Y. L., Jungme, P., Kiliaris, L., Kuang, M. L., Masrur, M. A., Phillips, A. M. and Qing, W. (2013) Intelligent Hybrid Vehicle Power Control - 2014;Part II: Online Intelligent Energy Management. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 62, 69-79.
- (Murphey et al., 2012) Murphey, Y. L., Jungme, P., Zhihang, C., Kuang, M. L., Masrur, M. A. and Phillips, A. M. (2012) Intelligent Hybrid Vehicle Power Control - Part I: Machine Learning of Optimal Vehicle Power. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 61, 3519-3530.
- (Navarro and Rudnick, 2009) Navarro, A. and Rudnick, H. (2009) Large-Scale Distribution Planning;Part II: Macro-Optimization With Voronoi's Diagram And Tabu Search. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 24, 752-758.
- (Nguyen et al., 2010) Nguyen, P. H., Kling, W. L., Georgiadis, G., Papatriantafidou, M., Tuan, L. A. and Bertling, L. (2010) Distributed routing algorithms to manage power flow in agent-based active distribution network. *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES*.
- (North American Electric Reliability Council, 1996) North American Electric Reliability Council (1996) Available Transfer Capability Definitions and Determination. North American Electric Reliability Council.



(North American Electric Reliability Council, 2008) North American Electric Reliability Council (2008) www.nerc.com Last access on 19 de noviembre de 2008.

(Ogasa, 2008) Ogasa, M. (2008) Energy Saving and Environmental Measures in Railway Technologies: Example with Hybrid Electric Railway Vehicles. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 3, 15-20.

(Organización Naciones Unidas, 1997) Organización Naciones Unidas (1997) Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Kyoto, Organización Naciones Unidas.

(Organización Naciones Unidas, 2009) Organización Naciones Unidas (2009) Kyoto Protocol: Status of Ratification. Organización Naciones Unidas.

(Palensky and Dietrich, 2011) Palensky, P. and Dietrich, D. (2011) Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 7, 381-388.

(Pathak et al., 2007) Pathak, J., Li, Y., Honavar, V. and McCalley, J. (2007) A Service-Oriented Architecture for Electric Power Transmission System Asset Management. IN Georgakopoulos, D., Ritter, N., Benatallah, B., Zirpins, C., Feuerlicht, G., Schoenherr, M. and Motahari-Nezhad, H. (Eds.) *Service-Oriented Computing ICSOC 2006*. Springer Berlin Heidelberg.

(Patterson, 1996) Patterson, M. G. (1996) What is energy efficiency? : Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24, 377-390.

(Pazderin and Yuferev, 2009) Pazderin, A. and Yuferev, S. (2009) Power flow calculation by combination of Newton-Raphson method and Newton's method in optimization. *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*.



- (Pearce et al., 2001) Pearce, J. M., Al Zahawi, B. A. T. and Shuttleworth, R. (2001) Electricity generation in the home: modelling of single-house domestic combined heat and power. *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings* -, 148, 197-203.
- (Phadke, 1993) Phadke, A. G. (1993) Synchronized phasor measurements in power systems. *Computer Applications in Power, IEEE*, 6, 10-15.
- (Pipattanasomporn et al., 2009) Pipattanasomporn, M., Feroze, H. and Rahman, S. (2009) Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation. *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES*.
- (Rajesh et al., 2003) Rajesh, K. G., Sandy, I. and Sandeep, K. S. (2003) Formal Methods for Dynamic Power Management. *Proceedings of the 2003 IEEE/ACM international conference on Computer-aided design*. IEEE Computer Society.
- (Ramirez-Rosado and Dominguez-Navarro, 2006) Ramirez-Rosado, I. J. and Dominguez-Navarro, J. A. (2006) New multiobjective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 21, 224-233.
- (Ray et al., 2007) Ray, L. E., Lever, J. H., Streeter, A. D. and Price, A. D. (2007) Design and power management of a solar-powered "Cool Robot" for polar instrument networks. *Journal of Field Robotics*, 24, 581-599.
- (Red Eléctrica de España, 2013) Red Eléctrica de España (2013) Sistema eléctrico español en 2012. *El sistema eléctrico*. Red Eléctrica de España ed., Red Eléctrica de España.
- (Ren et al., 2005) Ren, Z., Krogh, B. H. and Marculescu, R. (2005) Hierarchical adaptive dynamic power management. *Computers, IEEE Transactions on*, 54, 409-420.



- (Roche et al., 2010) Roche, R., Blunier, B., Miraoui, A., Hilaire, V. and Koukam, A. (2010) Multi-agent systems for grid energy management: A short review. *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*.
- (Saber and Venayagamoorthy, 2011) Saber, A. Y. and Venayagamoorthy, G. K. (2011) Plug-in Vehicles and Renewable Energy Sources for Cost and Emission Reductions. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 58, 1229-1238.
- (Sarvapali et al., 2011) Sarvapali, D. R., Perukrishnen, V., Alex, R. and Nick, J. (2011) Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid. *The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 1*. Taipei, Taiwan, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- (Schweickardt and Miranda, 2009) Schweickardt, G. and Miranda, V. (2009) A two-stage planning and control model toward Economically Adapted Power Distribution Systems using analytical hierarchy processes and fuzzy optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31, 277-284.
- (Shaw, 1995) Shaw, J. J. (1995) A direct method for security-constrained unit commitment. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 10, 1329-1342.
- (Siano et al., 2012) Siano, P., Cecati, C., Hao, Y. and Kolbusz, J. (2012) Real Time Operation of Smart Grids via FCN Networks and Optimal Power Flow. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 8, 944-952.
- (Sistla et al., 2011) Sistla, K., Mulla, D., V., G., M., R., Doraiswamy, S., Srinivasa, G. and Gilbert, J. D. (2011) Dynamically Adjusting Power Of Non-Core Processor Circuitry. US Patent, US20130080795A1.
- (Srinivasa Rao et al., 2011) Srinivasa Rao, R., Narasimham, S. V. L., Ramalinga Raju, M. and Srinivasa Rao, A. (2011) Optimal Network Reconfiguration of



- Large-Scale Distribution System Using Harmony Search Algorithm. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 26, 1080-1088.
- (Stott and Alsac, 1974) Stott, B. and Alsac, O. (1974) Fast Decoupled Load Flow. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-93, 859-869.
- (Swanson and Meindl, 1972) Swanson, R. and Meindl, J. (1972) Ion-implanted complementary mos transistors in low-voltage circuits. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 7, 146-153.
- (Takahashi and Matsuo, 2011) Takahashi, Y. and Matsuo, S. (2011) Running experiments of electric wheelchair powered by natural energies. *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*.
- (Teng, 2002) Teng, J.-H. (2002) A modified Gauss-Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 24, 97-102.
- (Thounthong et al., 2009) Thounthong, P., RaÅ«l, S. and Davat, B. (2009) Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 193, 376-385.
- (Tinney and Hart, 1967) Tinney, W. F. and Hart, C. E. (1967) Power Flow Solution by Newton's Method. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-86, 1449-1460.
- (Trias, 2012) Trias, A. (2012) The Holomorphic Embedding Load Flow method. *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*.
- (Tsikalakis and Hatziargyriou, 2011) Tsikalakis, A. G. and Hatziargyriou, N. D. (2011) Centralized control for optimizing microgrids operation. *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*.
- (UPnP, 2008) UPnP (2008) UPnP Device Architecture, Release 1.1. UPnP Forum.



- (Valdivieso-Sarabia et al., 2010) Valdivieso-Sarabia, R. J., García-Chamizo, J. M., Ferrández-Pastor, F. J. and Flórez-Revuelta, F. (2010) Sistema de climatización por suelo radiante coalimentado por energías renovables. *VIII Jornadas de aplicaciones y transferencia tecnológica de la inteligencia artificial, TTIA 2010 (AEPIA)*. Valencia, Print House.
- (Wang et al., 2013) Wang, B. C., Sechilariu, M. and Locment, F. (2013) Power flow Petri Net modelling for building integrated multi-source power system with smart grid interaction. *Mathematics and Computers in Simulation*, 91, 119-133.
- (Wencong et al., 2012) Wencong, S., Eichi, H., Wentz, Z. and Mo-Yuen, C. (2012) A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 8, 1-10.
- (White, 2006) White, L. A. (2006) Energy and the Evolution of Culture. IN Moore, H. L. and Sanders, T. (Eds.) *Anthropology in Theory: Issues in Epistemology*. Blackwell.
- (Xu et al., 2008) Xu, M., Hu, Z., Wu, J. and Zhou, Y. (2008) A hybrid society model for simulating residential electricity consumption. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 30, 569-574.
- (Yao and Li, 2012) Yao, Y. and Li, M. (2012) Designs of Fast Decoupled Load Flow for Study Purpose. *Energy Procedia*, 17, Part A, 127-133.
- (Zeng et al., 2009) Zeng, J., Liu, J. F., Ngan, H. W. and Wu, J. (2009) A multi-agent solution to energy management of distributed hybrid renewable energy generated system. *IET Conference Publications*, 2009, 112-112.
- (Zhao et al., 2012) Zhao, J., Chen, Y.-L., Chen, Z., Lin, F., Wang, C. and Zhang, H. (2012) Modeling and control of discrete event systems using finite state machines with variables and their applications in power grids. *Systems & Control Letters*, 61, 212-222.



Capítulo dos

Metodología de Modelado y Prototipado basado en Agentes

El capítulo propone una metodología para el modelado de soluciones basadas en agentes concebidos como sistemas multiagente. En primer lugar, se analizan las características de diversas metodologías de modelado existentes. Seguidamente, se describe la metodología de modelado y desarrollo propuesta que abarca desde la fase de análisis de requerimientos hasta la validación experimental, pasando por el diseño del sistema multiagente para un dominio determinado. El capítulo finaliza con un resumen del método descrito.



1. Agentes y sistemas multiagente

Los agentes y, en general, los sistemas multiagente permiten analizar, diseñar e implementar soluciones software para problemas complejos (Jennings et al., 1998). El uso de agentes permite que las decisiones generales se realicen de forma local, ya que cada agente únicamente dispone de una visión parcial de la información necesaria para la resolución del problema, de forma que los agentes pueden interaccionar con los demás para acceder al resto de información. Este enfoque permite concebir soluciones de inteligencia artificial distribuida para problemas complejos de diversos ámbitos (juegos de ordenador, tráfico aéreo, logística de transporte, control energético, etcétera.), cuya resolución de forma centralizada se vuelve computacionalmente prohibitiva.

La componente de inteligencia que subyace al concepto de agente, hace compleja la tarea de su propia definición, esto se debe, en parte, a que la comunidad científica no ha sido capaz de definir "Inteligencia" de forma universal. Existe una diversidad de conceptos relacionados con los agentes, que a menudo se encuentran solapados entre sí y cuyas definiciones no están universalmente aceptadas, entre ellas: "Agente", "Sistemas Basados en Agentes", "Sistemas Multiagente. Aunque no se hayan consensuado las definiciones generales, en cada uno de esos conceptos subyacen una serie de características básicas reconocidas por la comunidad científica. Estas características están plasmadas en (Jennings et al., 1998), en el que se define un agente o agente inteligente, como un sistema de cómputo, software/hardware, que se encuentra ubicado en un entorno de forma que es capaz de realizar acciones de forma autónoma para alcanzar unos objetivos. De dicha definición se pueden extraer unas características mínimas de "Dependencia de contexto", "Autonomía" y "Flexibilidad". La dependencia del contexto se refiere a la capacidad del agente de obtener datos y realizar acciones sobre entorno en el que está ubicado. Por su parte, autonomía hace alusión a la capacidad de funcionamiento desasistido, es decir, sin intervención humana o de otros agentes, siendo capaz de tomar sus propias decisiones, en función de su estado interno y de los datos obtenidos del entorno, para realizar las acciones sobre dicho entorno. El concepto de autonomía es amplio, por lo que da cabida por ejemplo a la capacidad de aprender de la experiencia previa. La flexibilidad hace referencia a la capacidad de realizar acciones para alcanzar sus objetivos. Este concepto también es suficientemente



amplio, por lo que da cabida a características más concretas como son: “receptivo”, “proactivo” y “social”. Receptivo para percibir el entorno y responder en un tiempo determinado a los cambios que ocurran en el entorno. Proactivo para tener iniciativa propia de forma que sea capaz de prever posibles situaciones y actuar consecuentemente para anticiparse. Social para interactuar con el resto de agentes o usuarios, cuando sea pertinente, para alcanzar sus objetivos y/o ayudar al resto de agentes a conseguir los suyos.

El concepto de agente presenta ciertas similitudes con el concepto de objeto utilizado en los paradigmas de programación orientada a objetos, por lo que puede causar confusión. En la revisión realizada en (Wooldridge, 1999), se analizan las similitudes y diferencias entre agentes y objetos. Los objetos se definen como entidades computacionales que encapsulan un estado y que son capaces de realizar acciones para modificar su estado y comunicarse con otros objetos mediante paso de mensajes. La primera diferencia se da en el grado de autonomía entre objetos y agentes. Los objetos basan su autonomía en el principio de encapsulación, definiendo sus variables de instancia y métodos privados a la clase (aunque no es recomendable pueden definirse públicos), de forma que es el propio objeto el que se encarga de controlar su propio estado. Los objetos son capaces de controlar su estado, pero no su comportamiento, ya que los métodos públicos, que son accesibles por otros objetos, van a poder ser invocados en todo momento, por lo que inevitablemente esos métodos serán ejecutados siempre que sean invocados por otros objetos. De esta forma, cuando un objeto hace público un método pierde el control sobre el mismo. En cambio, los agentes pueden solicitar acciones a otros agentes, pero es el propio agente, en función de sus propios objetivos, el que decide si realiza la acción solicitada o la deniega porque va en contra de sus objetivos. Esta diferencia la resume el siguiente enunciado: “objetos lo hacen gratis, agentes lo hacen por dinero”. La segunda diferencia hace referencia a la flexibilidad del comportamiento autónomo. El modelo de programación orientados a objetos estándar no incorpora por sí mismo comportamientos reactivos, proactivos o sociales, sino que se han de programar ad-hoc para cada objeto. La tercera diferencia relevante estriba en que los agentes poseen su propio hilo de ejecución de forma transparente y aunque bien es cierto que se pueden definir objetos para que se ejecuten como hilos de ejecución independientes, se han de implementar específicamente.

Una vez aclarado el concepto de agente inteligente, se procede a describir los diversos tipos de agentes en función de su arquitectura interna. En los trabajos



(Wooldridge and Jennings, 1995), (Wooldridge, 1999) se detallan los tipos clásicos de agentes: “deliberativos”, “reactivos” e “híbridos”. El término agente deliberativo fue acuñado por (Genesereth and Nilsson, 1987) y contiene información representativa sobre el modelo del mundo en el que está ubicado y donde las decisiones se toman utilizando un razonamiento lógico. Por su parte, los agentes reactivos no incluyen ninguna representación del mundo en el que están ubicados y por lo tanto no utilizan un complejo sistema de razonamiento simbólico. El exponente de tipo de agente híbrido, son los agentes creencias-deseos-intenciones (belief-desire-intentions, BDI) definidos en (Rao and Georgeff, 1991). Se basan en el proceso de razonamiento práctico, decidiendo en cada momento las acciones a realizar en función de sus objetivos. Las creencias representan la percepción del estado del mundo en el que están ubicados. Por otra parte, los deseos representan los objetivos a cumplir. Y las intenciones representan el conjunto de planes de acciones que el agente puede realizar para alcanzar los objetivos. El comportamiento del agente BDI consiste en dos acciones, la primera es decidir cuáles son los deseos a satisfacer y la segunda es determinar cómo se van a conseguir, es decir, elegir la intención adecuada en función de las creencias de ese instante. El trabajo (Nwana, 1996) define las propiedades básicas para clasificar a un agente: autonomía, aprendizaje y cooperación. Además, se identifica una tipología de agentes, adicionales a los comentados anteriormente. Incluye cuatro tipos en función de las propiedades que cumplen. En primer lugar, los “agentes inteligentes” son los que cumplen las tres propiedades. Los “agentes colaborativos” son los que cumplen las propiedades de autonomía y cooperación. Los “agentes de interfaz” son los que están dotados de autonomía y aprendizaje. Los “agentes de aprendizaje colaborativo” son los que cumplen las propiedades de aprendizaje y cooperación. Finalmente la clasificación de agentes que muestra el trabajo no contempla los de aprendizaje colaborativo, ya que considera la autonomía como una propiedad básica de los agentes.

Los sistemas basados en agentes utilizan la abstracción conceptual de agente a la hora de determinar estructuralmente la solución, que puede estar compuesta por uno o más agentes (Jennings et al., 1998). Esto repercute en que no tiene porqué implementarse como agentes, ni utilizar ninguna plataforma middleware para su implantación, siendo posible implementar la solución utilizando cualquier otro paradigma, como podría ser orientado a objetos, servicios web,... Alternativamente, los sistemas multiagente son concebidos e implementados como conjuntos de agentes sobre una plataforma que permita la



interacción entre ellos. Se puede definir como un conjunto de agentes distribuidos a lo largo de una red de comunicaciones, que trabajan de forma conjunta para solucionar problemas que van más allá de sus capacidades individuales o conocimiento de su problema particular (Jennings et al., 1998). Las características se pueden concretar en: cada agente tiene información o capacidades incompletas para resolver el problema; no hay ningún elemento de control centralizado; la computación es asíncrona. Entre los agentes se pueden dar diversos tipos de interacción: cooperación, cuando se relacionan para satisfacer un objetivo común de forma global; coordinación, cuando se organizan colectivamente para resolver un problema; negociación, cuando se alcanzan acuerdos que son llevados a cabo entre todos los agentes involucrados. De forma particular, la utilización de sistemas multiagente permite abordar la resolución distribuida de problemas, en contextos en los que existe una funcionalidad general, que se consigue a partir de las interacciones de cooperación de los agentes. Con tal objetivo, (Durfee, 1999) sugiere que los agentes han de cumplir como mínimo las siguientes características: cooperación con el resto de agentes de forma transparente sin ocultar información, que han de compartir los objetivos y ser capaces de ser integrados de forma conjunta para resolver el problema. Asimismo, desglosa el proceso de razonamiento distribuido en cuatro fases. La primera de ellas, se corresponde con la descomposición de la tarea global en tareas menos complejas o mínimas. La segunda, trata de asignar las tareas mínimas a cada uno de los agentes y de dotarlos de los recursos necesarios. La tercera, consiste en la resolución individual, por parte del agente, de las tareas mínimas. Y por último, la integración de soluciones, para satisfacer la tarea inicial. El enfoque propuesto por (Durfee, 1999), es válido para sistemas en los que los agentes comparten objetivos comunes, pero en aquellos en los que los agentes pueden presentar de forma local objetivos divergentes a los del resto es conveniente que se implementen interacciones de negociación entre los diversos tipos de agentes.

Los sistemas multiagente son los que mayor potencial presentan, debido a que son capaces de albergar a un conjunto de agentes capaces de interactuar entre ellos de forma cooperativa, coordinada o negociada, en función de la dupla de agente iniciador y receptor de la interacción. La inteligencia del sistema es el resultado de las interacciones entre los agentes entre sí y con el entorno (Brooks, 1991). La naturaleza de los agentes que componen el sistema multiagente puede ser heterogénea, ya que cada uno puede ser reactivo o deliberativo.



2. Metodologías de modelado

El “Lenguaje Unificado de Modelado” (UML) (Fowler and Scott, 2004) es un estándar ampliamente utilizado para el modelado -visualizar, especificar, construir y documentar- de sistemas software basados en el paradigma de programación orientado a objetos. En cambio, para las soluciones desarrolladas con agentes o sistemas multiagente, no existe ninguna metodología estándar o universal de modelado y desarrollo con agentes. Existe una amplia diversidad de metodologías: GAIA (Wooldridge et al., 2000), (Zambonelli et al., 2003); AUML (Bauer et al., 2001); PASSI (Cossentino, 2008); MaSE (Wood, 2000), (DeLoach et al., 2004); MAS-CommonKADS (Iglesias et al., 1998); BDI (Rao and Georgeff, 1991), Message (Cervenka, 2003); Tropos (Bresciani et al., 2004); Prometheus (Padgham and Winikoff, 2002), pero ninguna de ellas ha alcanzado un alto grado de utilización como para convertirse en un estándar de facto. Esto se debe, en parte, a la falta de una definición universal de agente o sistema multiagente, y que además se ve acentuado por los diversos tipos de arquitecturas de agentes (reactivos, deliberativos e híbridos), los distintos frameworks para el desarrollo de sistemas multiagente y la gran variedad de contextos de aplicación que determinan la idoneidad de unas metodologías sobre otras. Se han realizado esfuerzos para la creación y promoción de estándares para la tecnología basada en agentes y la interoperabilidad de dichos estándares con otras tecnologías. Concretamente con tal fin “Foundation for Intelligence Physical Agents” (FIPA) ha estado colaborando con “Object Management Group” (OMG). Dicha organización se ha encargado de elaborar el estándar para la especificación de agentes (FIPA, 2002), lo que ha permitido que se desarrollen frameworks compatibles con dicho estándar, siendo el “Java Agent Development Framework” (JADE) (Bellifemine and Rimassa, 2001) el que mayor éxito ha tenido en el ámbito científico.

2.1. Comparativa entre metodologías

A continuación se detallan, analizan y comparan algunas de las más relevantes metodologías para el modelado y desarrollo de soluciones basadas en agentes inteligentes. Aunque existen una amplia variedad de metodologías, se van a analizar por la complementariedad de sus respectivas filosofías, características, y



ámbitos de uso. Se contemplan las siguientes metodologías: GAIA, BDI, AUML y MAS-CommonKADS.

2.1.1. Metodología GAIA

La metodología GAIA (Wooldridge et al., 2000), (Zambonelli et al., 2003) es una metodología orientada a agentes para análisis y diseño. Está concebida de una forma lo más general posible para ser utilizada en una gran diversidad de dominios de aplicación, preferentemente en sistemas para aplicaciones reales de gran escala con las siguientes características:

- Cada agente utiliza una serie de recursos computacionales.
- Se da por hecho que el objetivo es obtener un sistema que maximice alguna función objetivo, pero que puede ser sub-óptima. No está pensado para sistemas que puedan entrar en conflicto.
- Los agentes pueden ser heterogéneos, por lo que pueden estar implementados con diversos lenguajes de programación, arquitecturas y técnicas. No se define el uso de ningún framework en particular.
- Las habilidades, servicios que ofrecen e interacciones que son capaces de proporcionar los agentes son estáticas, ya que no cambian durante el tiempo de ejecución.
- Sistemas compuestos por un número menor de 100 agentes.

GAIA está basada en la visión de los sistemas multiagente como organizaciones computacionales compuestos de varios tipos de roles interactuando entre ellos. Los conceptos que define GAIA se pueden clasificar en abstractos o concretos. Los abstractos se utilizan durante la fase de análisis, para definir conceptualmente el sistema, aunque pueden no tener ninguna relación directa con él. Los concretos son utilizados en la fase de diseño, por lo que tendrán su correspondencia con los elementos que formarán la solución computacional. Por lo tanto, GAIA define la construcción de sistemas multiagente como un proceso organizacional basado en dos fases: análisis y diseño. La figura 2.1 muestra dichas fases, los modelos necesarios en cada fase y las relaciones entre los modelos.

La fase de análisis se encarga de comprender la estructura del sistema, que se define en la organización del sistema, considerando una organización como un conjunto de roles que se relacionan entre ellos. Esta fase parte del conjunto de



requerimientos del sistema para producir dos modelos. El modelo de roles y el modelo de interacción.

El modelo de roles identifica a los principales roles que se dan en el sistema. A su vez, cada rol se define por una serie de responsabilidades, actividades, permisos, y protocolos. Las responsabilidades determinan la funcionalidad y es, quizás, la propiedad de mayor relevancia de los roles. Los permisos asociados a un rol definen los derechos que dicho rol posee, es decir, los recursos que el rol es capaz de utilizar para realizar las responsabilidades. Las actividades representan las acciones que el rol puede realizar a través de un agente, sin interactuar con otros agentes. De forma análoga al paradigma orientado a objetos se corresponde con los métodos privados de una clase. Por el otro lado, los protocolos definen como se relaciona un rol con otros roles.

El modelo de interacción refleja las relaciones entre los distintos roles que definidos en el sistema. Las relaciones se consideran patrones de interacción definidos formalmente e independientes del rol que los utilice. Los patrones de interacción o protocolos están compuestos por una secuencia de mensajes que se van intercambiando los roles en tiempo de ejecución. Un protocolo se define a partir de los siguientes atributos: finalidad, que describe el propósito de la interacción; iniciador, el rol que inicia la interacción; receptor, el rol que recibe la solicitud de interacción; entradas, la información que utiliza el rol iniciador al solicitar la interacción; salidas, la información enviada por el rol receptor durante la interacción; procesamiento, una descripción del procesamiento que el rol iniciador realiza durante la interacción.

La fase de diseño tiene la misión de transformar los modelos abstractos definidos en la fase de análisis, en modelos con un nivel de abstracción suficientemente bajo como para poder implementarlo de forma sencilla. La fase de diseño incluye tres modelos: el modelo de agentes, modelo de servicios y modelo de conocimiento.

El modelo de agentes define tanto los tipos de agentes que van a poder ser instanciados en el sistema multiagente, como las instancias de cada uno de esos tipos en tiempo de ejecución. Cada tipo de agente puede ser considerado como un subconjunto de los roles, definidos en el citado modelo de roles. La selección de estos grupos la realiza el diseñador en función de su experiencia y criterio, agrupando roles cuyas finalidades sean afines.



El modelo de servicios identifica los servicios principales de los roles de cada agente, especificando las propiedades que definen a cada servicio. Los servicios se consideran como las acciones que están disponibles a otros agentes, aunque se pueden definir servicios que no sean requeridos por ningún agente. Las propiedades que definen a cada servicio son: entradas, salidas, pre/post condiciones. Las entradas y las salidas se obtienen del modelo de interacción definido en la fase de análisis. Las pre y post condiciones son las restricciones que mantienen la coherencia y la seguridad en el estado del agente. Cada rol tiene como mínimo asociado un servicio.

El modelo de conocimiento refleja las relaciones existentes entre los distintos tipos de agentes, definiendo únicamente la capacidad de enviar mensajes de un agente a otro pero sin llegar a especificar qué tipo de mensajes se envían. La utilidad es la identificación de posibles cuellos de botella durante las interacciones entre los agentes.

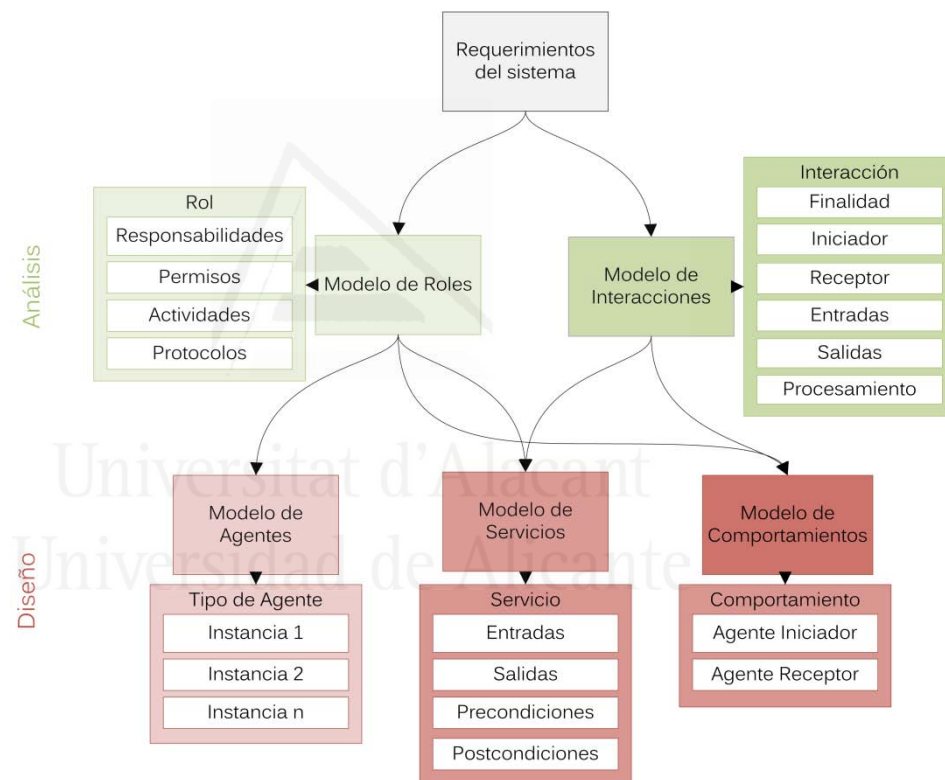


Figura 2.1. Relaciones entre los modelos que define la metodología GAIM



2.1.2. Metodología BDI

El modelo basado creencias-deseos-intenciones (BDI) fue concebido por Bratman como una teoría práctica del razonamiento humano (Bratman, 1987). La metodología basada en los agentes BDI (Rao and Georgeff, 1991), (Kinny et al., 1996) extiende las técnicas de modelado orientado a objetos para aplicarlas a agentes BDI. Se distinguen dos niveles de abstracción desde el punto de vista externo y desde el punto de vista interno. De esta forma se definen dos tipos de modelos: externos e internos.

Los modelos externos modelan el sistema desde el punto de vista externo al sistema, definiendo una jerarquía de clases de agentes, donde los agentes individuales son instancias. Las clases de agentes están caracterizadas por su propósito, responsabilidades, servicios que desarrollan y la información acerca del mundo que requieren e interacciones externas. Esto se concreta en los modelos de agentes y modelos de interacción.

El modelo de agente describe la relación jerárquica entre las clases abstractas y concretas de agentes. Identifica las instancias de agente que deben existir en el sistema.

Por su parte, el modelo de interacción muestra las responsabilidades de cada una de las clases de agente, los servicios que provee, interacciones asociadas y relaciones de control entre clases de agentes. Describe los mensajes de comunicación entre agentes y entre agentes y otros componentes del sistema.

Los modelos internos describen de forma abstracta a cada agente internamente, indicando las creencias, los deseos y las intenciones. Están compuestos por el conjunto de modelos que permiten estructurar el estado, la motivación, la información de los agentes y las estructuras de control que determinan sus conductas. Por lo tanto, está compuesto por el modelo de creencias, modelo de deseos y modelo de intenciones.

El modelo de creencias describe la información acerca del entorno, el estado interno que cada clase de agente puede tener y las acciones que puede realizar.

El modelo de deseos define los objetivos que un agente puede adoptar y a los eventos a los que debe responder.



El modelo de intenciones representa el conjunto de planes, entendiendo planes como una tupla de acciones, que el agente puede utilizar para alcanzar sus objetivos o responder a los eventos que percibe.

La metodología de modelado en agentes BDI se centra sobre todo en el punto de vista interno, definiendo en menor manera el punto de vista externo, es decir, las interacciones y organizaciones. Las relaciones entre los modelos y los atributos que componen a cada uno de ellos se muestran en la figura 2.2

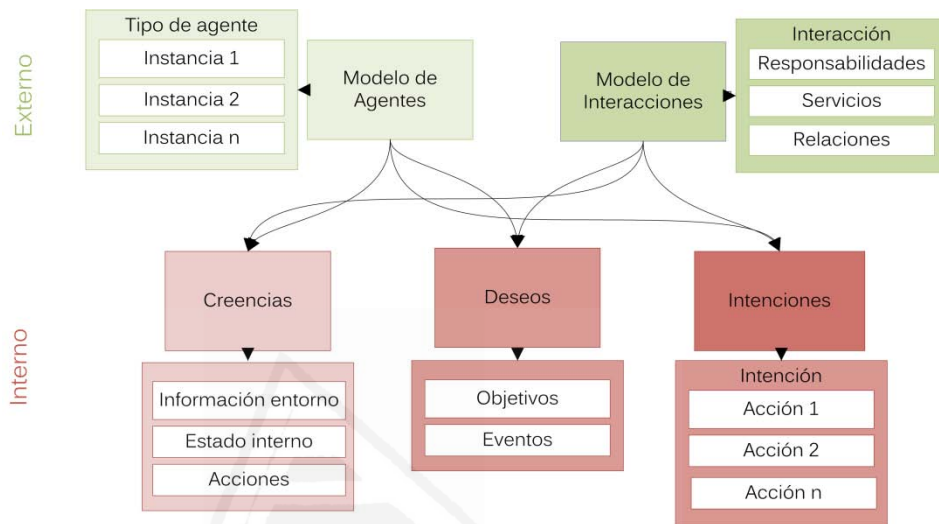


Figura 2.2. Relaciones entre los modelos que componen la metodología BDI

2.1.3. Metodología AAML

La metodología basada en el “lenguaje unificado de modelado con agentes” (AAML) (Bauer et al., 2001) implementa herramientas de desarrollos existentes en el “lenguaje unificado de modelado” (UML) que se utiliza en el paradigma orientado a objetos. Las herramientas están orientadas hacia los conceptos y terminología definida en la teoría de agentes. Los agentes se presentan como una evolución de los objetos. Se trata de utilizar la aceptación de UML para consolidarse como un estándar de facto.



UML, por sí solo, no tiene la potencia expresiva necesaria para modelar agentes, ya que: los agentes son activos y los objetos no; sus actividades incluyen objetivos y condiciones que guían la ejecución de las tareas definidas; toman la responsabilidad de sus necesidades; los agentes actúan de igual forma, solos o con otros agentes; y forman una comunidad de miembros independientes que actúan de forma autónoma. UML define y formaliza una serie de métodos, para dar apoyo al ciclo de vida del software orientado a objetos mediante los siguientes modelos (Odell et al., 2000):

- Modelos estáticos: describen de forma estática la semántica de los datos y mensajes, mediante los diagramas de clases y paquetes.
- Modelos dinámicos: definen las interacciones entre las clases, para ello se utilizan los diagramas de secuencia, colaboración, estado y actividad.
- Casos de uso: especifica las acciones que un sistema o clase puede realizar para interactuar con actores externos.
- Modelos de implementación: describen la distribución de los componentes en las diferentes plataformas, para ellos se utilizan los diagramas de implantación.
- Lenguajes de restricción de objetos: permiten describir formalmente las restricciones y establecer pre o post condiciones a los modelos.

AUML se presenta como una extensión de UML, sugiriendo extensiones sobre los diagramas UML: paquetes, plantilla, secuencia, actividad, colaboración, clases, implantación y de estado. Persiguiendo superar, aunque sea parcialmente, las carencias que UML presenta para modelar sistemas basados en agentes. De forma específica los esfuerzos se han centrado en especificar protocolos de interacción entre agentes (AIP) y representar las estructuras sociales y organizativas entre los agentes.

Los diagramas extendidos de UML se organizan en tres niveles: global del protocolo; interacción entre los agentes; y procesamiento interno. Los diagramas, por tanto, quedan agrupados en función de su cometido. La figura 2.3 resume los diagramas UML extendidos para cada uno de los niveles que define la metodología AUML.

El nivel de representación global del protocolo se encarga de modelar patrones y soluciones reutilizables, que puedan ser reutilizadas en otros agentes. Los protocolos de interacción entre agentes se pueden considerar como



elementos a reutilizar. Los diagramas UML, que tienen mayor capacidad para expresar la reusabilidad, son el diagrama de paquetes y plantillas.

El diagrama de paquetes agrupa elementos de modelado para componer conceptualmente entidades de mayor envergadura. La agrupación se realiza de forma arbitraria. El diagrama de plantillas es un modelo parametrizado, cuyos parámetros obtienen valor posteriormente. Su uso principal es para definir los protocolos de interacción de agentes.

El nivel de representación de interacción entre los agentes está compuesto por los siguientes diagramas: secuencia, colaboración, actividad y estado. Los diagramas de secuencia y colaboración contienen la misma información, aunque el de secuencia enfatiza la secuencia cronológica de las interacciones, mientras que el de colaboración realza las asociaciones entre los agentes. Los diagramas de actividad y estado muestran el flujo de cómputo en la comunidad de agentes.

El nivel de representación del procesamiento interno del agente es el de más bajo nivel y se encarga de detallar el proceso que tiene lugar en el interior del agente. Los diagramas de actividades y de estado son capaces de especificar el comportamiento interno de los agentes.

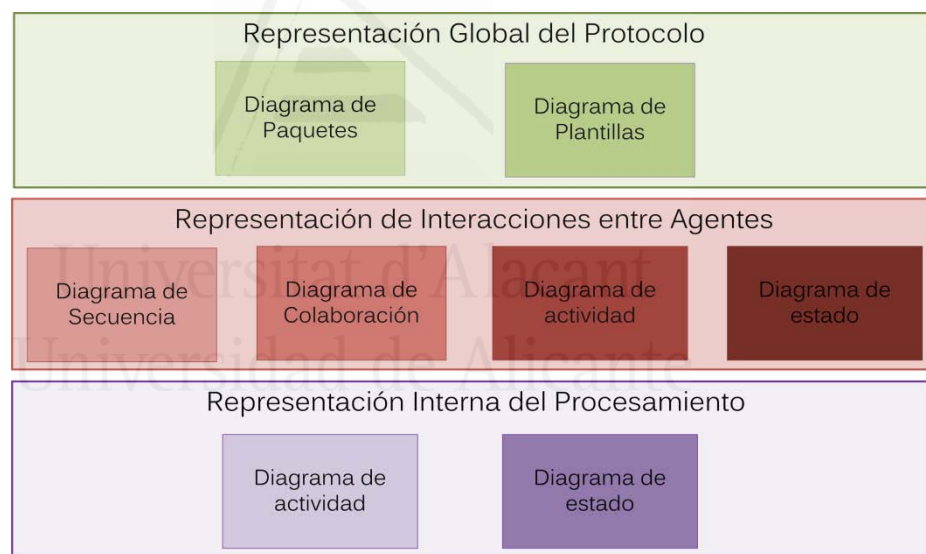


Figura 2.3. Organización de los diagramas que modelan a los sistemas multiagente bajo la metodología AUML



2.1.4. Análisis de metodologías

La amplia diversidad de metodologías existentes hace conveniente analizar y comparar cada una de ellas con el fin de detectar las debilidades y fortalezas. El trabajo realizado en (Tran et al., 2005) compara las metodologías MASE, GAIA, BDIM, Prometheus y MAS-CommonKADS de forma sistemática utilizando el framework (Tran et al., 2003) que permite realizar un análisis comparativo en función de 3 puntos de vista.

El análisis desde el punto de vista del proceso de desarrollo muestra que BDIM no establece el ciclo de vida del modelo y tampoco establece mecanismos de refinamiento iterativos de sus modelos. El resto de metodologías incluyen mecanismos de refinamiento iterativo o incremental y abarcan las fases de análisis y diseño, excepto MAS-CommonKADS que además incluye una fase de conceptualización. Las metodologías GAIA y MaSE presentan un esquema de desarrollo de arriba hacia abajo, mientras que Prometheus hace uso del enfoque de abajo hacia arriba, siendo BDIM y MAS-CommonKADS híbridas. Además, identifica tres categorías de enfoque para el desarrollo de sistemas multiagente: enfoque genérico, que puede ser orientado a objetos (OO) o basado en conocimientos ingenieriles (CI); el enfoque basado en roles: puede ser orientado a roles (OR) o no orientado a roles (NOR); y el tercer enfoque, de identificación de roles, en el caso de que sea orientado a roles, se realiza un análisis orientado a objetivos (AO) o un análisis basado en comportamiento (AC).

El análisis desde el punto de vista del modelo refleja que MAS-CommonKADS es capaz de representar el mayor número de conceptos propios de la teoría de agentes, ya que contiene un amplio número de modelos. Todas las metodologías ofrecen explicaciones detalladas de sus modelos, excepto MAS-CommonKADS que no ofrece notación para el modelo de diseño. Además, todas las metodologías, exceptuando MAS-CommonKADS, permiten transformar unos modelos en otros realizando una serie de pasos o utilizando técnicas concretas. El criterio de consistencia permite establecer el grado de coherencia y consistencia entre los diversos niveles de abstracción definidos en cada metodología. Las metodologías con mayor consistencia son MASE y Prometheus.

El análisis, desde el punto de vista de los conceptos soportados por cada una de las metodologías de modelado orientado a agentes, está detallado en la tabla 2.1. Dicha tabla se ha extraído de (Tran et al., 2005) y se ha complementado con



los datos relativos a la metodología AUML. Los conceptos se muestran agrupados en una serie de categorías, que representan el “dominio del problema”, las “propiedades de los agentes”, las “relaciones entre agentes”, e “interacciones entre agentes” (Tran et al., 2003).

El análisis comparativo entre las diferentes metodologías soslaya que aunque la mayoría de ellas tienen aspectos en común -definir fases de análisis y diseño; definir interacciones entre los agentes; definir la naturaleza interna de cada agente; y utilizan notación basada en UML- difieren en el enfoque global que tiene cada metodología, ya que cada una, además de los conceptos anteriores, incorpora una gran diversidad de conceptos de mayor grado de concreción que las dota de un carácter diferenciador. La distinta naturaleza de cada una de ellas hace que la elección de una de ellas dependa del ámbito específico del problema a solventar. Particularmente, GAIA presenta un ámbito de aplicación mucho más genérico y amplio, lo que repercute negativamente en que sea demasiado teórica y que su adaptación a aplicaciones reales no sea trivial. En cambio, MESSAGE presenta un enfoque menos teórico y más pragmático lo que facilita su adaptación a problemas reales, pero debido al gran número de modelos y vistas que define, su uso resulta complejo. Un aspecto común a todas ellas es que no especifican el método de obtención de los tipos o clases de agentes que van a formar la solución. Algunas de ellas especifican esa tarea pero no proporcionan mecanismos formales ni sistematizados para la obtención del conjunto de clases de agentes, sino que dejan tal proceso en manos de la persona encargada de diseñar la solución. En este caso, el éxito de la tarea va a estar determinado por las habilidades y experiencia de dicha persona.

La metodología que se propone tiene el doble objetivo de: situarse en un nivel intermedio entre la teoría y el pragmatismo, alcanzando un equilibrio entre el grado de la complejidad y agilidad de su utilización; y de definir formalmente y sistematizar la tarea de definición de clases de agentes. La metodología persigue ofrecer soluciones generales y aplicables independientemente del ámbito del problema, pero debido a la naturaleza del problema de este trabajo va a ser descrita para el caso del contexto eléctrico.



Conceptos	AUML	MaSE	GAMA	BDIM	Prometheus	Commo	MAS-
Análisis del Domino del Problema							
Identifica objetivos		✓					
Identifica roles	✓	✓	✓	✓			
Identifica funcionalidades/tareas		✓	✓		✓		✓
Responsabilidades de tareas		✓	✓	✓			
Requerimientos de diseño	✓						
Casos de uso	✓	✓			✓		✓
Propiedades de agente							
Tipos de agente	✓	✓		✓	✓		✓
Instancias de tipos de agente		✓		✓	✓		✓
Roles que implementa el agente		✓		✓			✓
Funcionalidad del agente	✓	✓		✓	✓		✓
Creencias y conocimiento del agente				✓	✓		✓
Planes del agente				✓	✓		✓
Objetivos del agente		✓		✓			✓
Aptitudes del agente				✓	✓		✓
Movilidad del agente	✓						
Interacción entre agentes							
Relaciones de interacción	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Intercambio de mensajes	✓	✓		✓	✓		✓
Protocolos de interacción	✓	✓			✓		✓
Ontologías							
Relaciones entre agentes							
Herencia	✓			✓			✓
Agregación	✓		✓	✓			✓
Asociación	✓		✓	✓			✓
Sistema/Entorno							
Coexistencia de entidades no agentes	✓				✓		
Infraestructuras del entorno			✓				
Interacciones entre agentes y entorno	✓				✓		✓
Características del entorno							
Implantación							
Arquitectura de agente		✓					✓
Ubicación de instancias de agentes	✓	✓					

Tabla 2.1. Análisis comparativo de los conceptos soportados por cada metodología (Tran et al., 2005)



3. Metodología funcionalidad-estructura-tecnología (FET)

La metodología de modelado y desarrollo de sistemas multiagente funcionalidad-estructura-tecnología (FET) hace patente el paradigma de diseño de arriba hacia abajo, enfatizando el diseño genérico en las etapas iniciales, retrasando todo lo posible la concreción de detalles, persiguiendo mantener el modelo y el diseño del sistema multiagente en su expresión más general, particularizando los parámetros únicamente cuando sea necesario. Esta filosofía va en consonancia con los postulados de las arquitecturas dirigidas por modelos. Hace posible la automatización, parcialmente supervisada, de ciertas fases o tareas de la metodología. Lo que le proporciona flexibilidad, ya que los cambios realizados se propagan de forma trivial. También proporciona celeridad de desarrollo, ya que al concretar al final del método se pueden reutilizar las fases y tareas anteriores, teniendo únicamente que dar valores a los parámetros para crear un nuevo sistema multiagente.

El método está organizado por fases, estando cada una de ellas compuesta por tareas. Las fases no se encuentran totalmente diferenciadas unas de otras, ya que es difícil establecer tareas que, única y exclusivamente, hagan referencia a la fase que las contiene. Es por ello que no es trivial establecer unos límites claros entre dos fases, por lo tanto, el cambio de fase se produce gradual y progresivamente. Las tareas ubicadas al final de una fase tienen a dicha fase predominante aunque en cierta manera algunos aspectos de la siguiente fase empiezan a reflejarse en ella. Análogamente, las tareas ubicadas al comienzo de una fase, aun siendo predominante dicha fase también subyacen aspectos relacionados con la fase anterior. Una posible alternativa a este enfoque es definir tareas tan sencillas que únicamente estén relacionadas con su fase principal. Esta alternativa, que aplica la estrategia de resolución de problemas "Divide y Vencerás", tiene el doble inconveniente de que no es trivial la descomposición en multitud de tareas sencillas y, aún siendo posible, no resulta operativa, debido al gran número de tareas hace que la metodología se vuelva compleja y tediosa.

Se definen tres fases: análisis, diseño, e implantación, tal y como muestra la figura 2.4. Las dos primeras fases, análisis y diseño, tienen como objetivo obtener el modelo basado en agentes para la familia de problema del contexto a modelar.



Dicho modelo se utiliza como entrada en la fase de implantación para obtener el sistema multiagente concreto que soluciona uno de los problemas particulares que el modelo es capaz de resolver e integrarlo en el entorno real donde va a realizar su cometido.

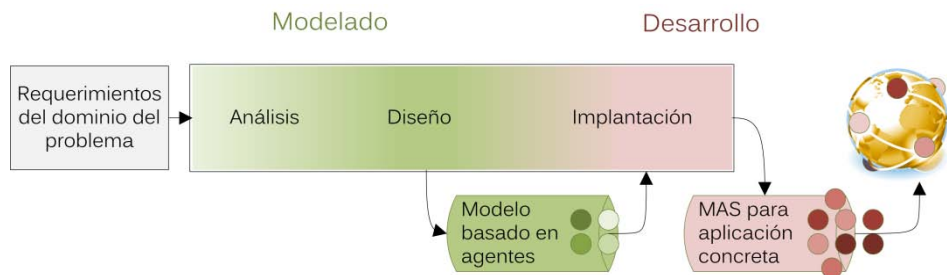


Figura 2.4. Fases de la metodología FET de modelado y desarrollo

3.1. Fase de análisis

Concebir un modelo basado en agentes, para un dominio de aplicación concreto, requiere realizar un análisis que permita abstraer cuales son las entidades idóneas, en este caso agentes, que permitan reflejar con la suficiente potencia expresiva el comportamiento y/o las funciones particulares de dicho dominio. La fase de análisis tiene el objetivo particular de dar respuesta a la pregunta ¿Qué?, es decir, debe definir las clases de agentes que van modelar el dominio de aplicación.

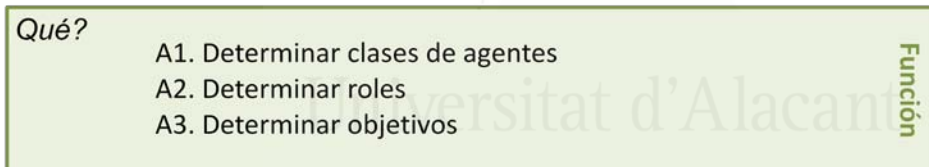


Figura 2.5 Tareas que componen la fase de análisis

Tal y como muestra la figura 2.5, la fase de análisis está compuesta por tres tareas: "Determinar clases de agentes", "Determinar roles" y "Determinar objetivos". En primer lugar, la tarea de determinación de clases de agentes utiliza los requerimientos funcionales del dominio del problema a solucionar para obtener las clases de agentes que van a formar parte del modelo. Seguidamente, la segunda tarea, tomando como base las clases de agentes, especifica los



diferentes roles que se pueden dar en cada agente, identificando roles comunes a varios agentes, que se van a poder reutilizar. La última tarea de esta fase se encarga de establecer los objetivos para cada uno de las clases de agentes.

3.1.1. Tarea A1. Determinación de clases de agentes

La tarea de determinación de agentes, toma como punto de partida un conjunto finito de agentes, A , del que se desconoce el número de elementos. Utilizando los requerimientos funcionales se trata de establecer una relación de equivalencia binaria, R , sobre el conjunto de agentes, A , con el fin de particionar dicho conjunto en subconjuntos, a poder ser disjuntos, en función de la naturaleza de los nodos. Los requerimientos funcionales serán los que permitan definir la relación de equivalencia de la forma más adecuada posible. Es conveniente que la relación binaria R sea una relación de equivalencia en A , cumpliendo las propiedades reflexiva, simétrica y transitiva. A partir de la relación de equivalencia R se puede obtener el conjunto cociente A/R , donde se determina la partición P con el conjunto de clases de equivalencia de A . El número de clases de equivalencia está determinado por la propia definición de la relación de equivalencia R . Por este motivo, es conveniente elegir R adecuadamente para que el número y tipos de clases de agentes permitan modelar el dominio del problema. Al aplicar R sobre A se obtienen las siguientes clases de equivalencia: A_1, A_2, \dots, A_n , de forma que, si se considera conveniente, se puede volver a realizar el proceso sobre cada uno de los conjuntos obtenidos. Este procedimiento puede ser iterado hasta que las clases de agentes resultantes de aplicar relaciones de equivalencia sean suficientemente específicas para modelar del dominio del problema a tratar. El resultado ideal de aplicar este método es un árbol, cuyas hojas representan las clases de agentes a utilizar en el modelo, pero es común que si se intentan modelar dominios complejos y/o no se utilizan las relaciones de equivalencia adecuadas, se pueden obtener conjuntos solapados, por lo que aparecerán hojas idénticas en diferentes ramas del árbol, en este caso habría que agruparlas o bien reconsiderar utilizar otras relaciones de equivalencia o variar el orden de aplicación de dichas relaciones. Esto último es relevante, ya que la idoneidad de las clases de agentes identificadas depende de las relaciones de equivalencia utilizadas y del orden utilizado.



Los documentos resultantes de esta tarea, que serán utilizados en las posteriores son:

- Árbol con la jerarquía de clases de agentes.
- Para cada una de las hojas del árbol un diagrama de clases extendido para agentes, basado en la notación UML, donde únicamente se especifica el nombre de la clase de agente.

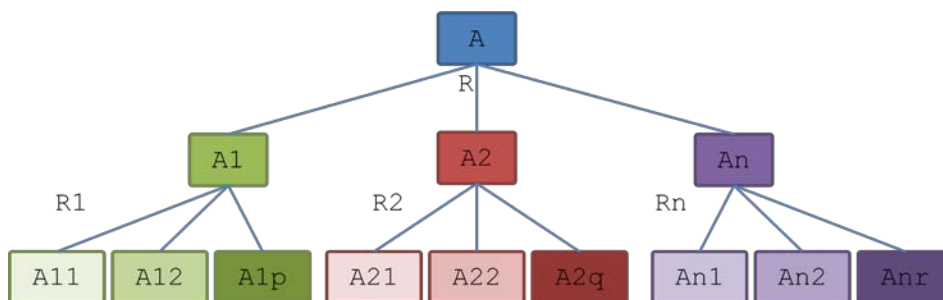


Figura 2.6 Árbol resultado del proceso de obtener las clases de agentes definiendo relaciones de equivalencia

El siguiente ejemplo trata de ilustrar el procedimiento descrito anteriormente. Supongamos que se quieren modelar los medios de transporte. En primer lugar se define A como el conjunto de agentes que modelan a todos los medios de transporte. Seguidamente, se define la relación de equivalencia R sobre A , de forma que dos agentes del conjunto de A están relacionados mediante la relación de equivalencia, R , definida sobre A , si “los agentes utilizan el mismo medio para desplazarse”. El número de clases de equivalencia está determinado por el número de posibles valores de medios, por lo que al aplicar R sobre A , se obtienen tres clases de equivalencia: $[A_1]$ los que se desplazan sobre la tierra, $[A_2]$ los que se desplazan por el agua, y $[A_3]$ los que desplazan por el aire. Después de aplicar R , hemos obtenido únicamente tres tipos de medios de transporte, y como consideramos que no se ha obtenido suficiente nivel de detalle, se procede a definir nuevas relaciones de equivalencia para cada uno de las clases de equivalencia resultantes $[A_1]$, $[A_2]$ y $[A_3]$.

Como el propósito del ejemplo es ilustrar la tarea de obtención de clases de agentes, únicamente se va a seguir desarrollando una de las tres clases de equivalencia, en este caso $[A_1]$ que se corresponde con los que son capaces de



desplazarse por tierra. Para este conjunto se dice que dos agentes del conjunto A_1 están relacionados mediante la relación de equivalencia, R_1 , definida sobre A_1 , si “los agentes utilizan el mismo número de ruedas”. El número de clases de equivalencia está determinado por el número de posibles valores de número de ruedas, por lo que en principio podría ser infinito, pero utilizando los requerimientos del dominio del problema a modelar se delimita a un máximo de cuatro ruedas y excluyendo a aquellos de mayor número. Aplicando R_1 sobre A_1 , se obtienen cuatro clases de equivalencia: $[A_{11}]$ los que tienen una rueda; $[A_{12}]$ los que tienen dos ruedas; $[A_{13}]$ los que tienen tres ruedas; y $[A_{14}]$ los que están dotados de cuatro ruedas. Una vez alcanzado este punto, si el nivel de especificidad es suficiente, es posible detener el proceso, quedando cuatro clases de agentes para vehículos terrestres:

- $[A_{11}]$ clase de agente monociclo que representa a monociclos.
- $[A_{12}]$ clase de agente biciclo que representa a bicicletas, motocicletas, etc.
- $[A_{13}]$ clase de agente triciclo que representa a triciclos, carros de tres ruedas, etc.
- $[A_{14}]$ clase de agente cuadríciclo que representa a coches, quads, camionetas, etc.

3.1.2. Tarea A2. Determinación de roles

El objetivo de esta tarea es determinar los distintos roles que se pueden dar en cada una de las clases de agentes, de esta forma es probable que varias clases de agentes compartan roles idénticos. Se persigue identificar elementos, en este caso roles, que van a poder ser reutilizados por las distintas clases de agentes. La filosofía subyacente a la metodología FET, que primero identifica los agentes y posteriormente los roles de cada uno de los agentes para reutilizar los comunes, es opuesta a la metodología GAIA. GAIA define en primer lugar los distintos roles y los agrupa en función de su afinidad, para ir componiendo las clases de agentes como una agregación de roles. En el caso de GAIA se ve como utiliza un esquema de abajo hacia arriba, el enfoque propuesto, en cambio, es capaz de seguir el esquema de arriba hacia abajo, gracias a la utilización de un método sistematizado basado en las relaciones de equivalencia.

Esta tarea utiliza como entradas los documentos obtenidos en la tarea anterior. El proceso de identificar los roles es análogo al de identificar a las clases



de agentes, con la excepción de que: se utiliza como conjunto de partida, el conjunto formado por todas las clases de agentes, E , obtenidas en la tarea anterior; en cada iteración se aplica una única relación de equivalencia, R' ; y las clases de equivalencia obtenidas representan el rol y las clases de agentes que se encuentran en dicho conjunto comparten dicho rol, facilitando la reutilización. Es posible que una clase de agente aparezca en más de una de las clases de equivalencia obtenidas al aplicar la relación de equivalencia R' .

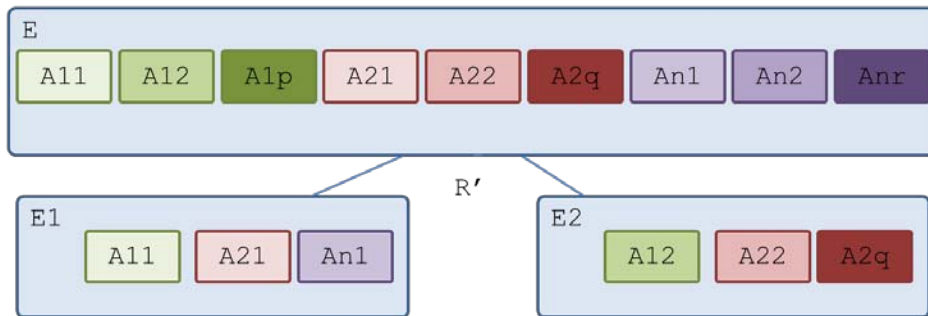


Figura 2.7 Árbol que muestra los roles que comparten cada uno de las clases de agentes al aplicar R'

En este caso el proceso iterativo consisten en volver a coger como conjunto inicial E y buscar otra relación de equivalencia R'' que permita seguir identificando roles. Este proceso iterativo puede seguir mientras que se sea capaz de definir nuevas relaciones de equivalencia, cuyas clases de equivalencia contengan un mínimo de dos clases de agentes.

Siguiendo con el ejemplo de los medios de transporte, el conjunto E está formado por las clases de agente A_{11} , A_{12} , A_{13} , A_{14} . En primer lugar se puede definir la relación de equivalencia R' , que relaciona a dos clases de agentes si cumplen que “puede ser alquilado”. Se obtiene dos clases de equivalencia: los que tienen propósito comercial [E_1] y los que no [E_2]. Donde cada clase de equivalencia contiene a las cuatro clases de agentes, ya que a partir de los requerimientos del dominio, observamos que todos los vehículos se pueden alquilar. De esta forma, se obtiene que cada clase de agente debe implementar el rol de ser alquilado o el de ser propiedad de un particular. Este procedimiento se puede iterar hasta que no se encuentren nuevos roles.



Los documentos resultantes de esta tarea, que serán utilizados en las posteriores son:

- Árboles con los roles compartidos con los agentes.
- Para cada diagrama de clases extendido de agentes se añaden los roles que implementa.

3.1.3. Tarea A3. Determinación de objetivos

La tarea se encarga de determinar los objetivos que van a guiar el comportamiento de cada una de las clases de agentes y de los roles. Aunque en la fase de análisis únicamente se han de describir funcionalmente los objetivos, es conveniente definir los objetivos de cada clase de agentes orientados al uso de parámetros, ya que así en la fase de diseño será sencillo definir los parámetros y funciones que permitan optimizar dichos objetivos. En la fase de implantación, al definir las instancias de dichas clases de agentes, se podrán asignar valores concretos a los parámetros, que determinan los objetivos, de forma que cada instancia pueda tener sus propios objetivos.

Existen diversas formas a la hora de establecer la cardinalidad de los objetivos a satisfacer. Se puede definir un único objetivo por clase de agente, de forma que buscar su optimización no requiera grandes costes computacionales. En cambio, si se quieren definir varios objetivos a satisfacer, buscar una solución óptima puede ser una tarea compleja que necesite utilizar técnicas propias de la optimización multivariable como son las basadas en: óptimos de Pareto (Ngatchou et al., 2005); combinación de objetivos donde se cada uno es ponderado e integrado; priorización de objetivos, en el que cada uno tiene una importancia relativa. La determinación del número de objetivos de cada clase de agente dependerá, parcialmente, de la taxonomía de clases de agentes y de sus respectivos roles, obtenida en las tareas A1 y A2. Si se han obtenido un número reducido de agentes, es probable que cada uno de ellos necesite optimizar múltiples objetivos, en cambio si se han obtenido un significativo número de clases agentes con roles muy específicos es probable que únicamente requieran un único objetivo, de forma que la optimización multiobjetivo se consigue a partir de las interacciones entre las instancias de las clases de agentes.



Dada la naturaleza de los roles subordinada a los agentes y a la mayor especialización se pueden identificar objetivos, generalmente uno, pudiendo llegar a ser varios, asociados a los roles. Así se consigue que cada rol sea semiautónomo de acuerdo a sus objetivos particulares, aunque sean los objetivos del agente que contiene al rol, los que realmente coordinen y condicionen las acciones a desarrollar por cada uno de los roles. El resultado de realizar esta tarea se materializa en:

- Para cada diagrama de clases extendido de agentes se añade una lista de los objetivos que persigue.
- A cada rol definido en el diagrama de clases se le añaden los objetivos que persigue.

3.1.4. Resumen de la fase de análisis

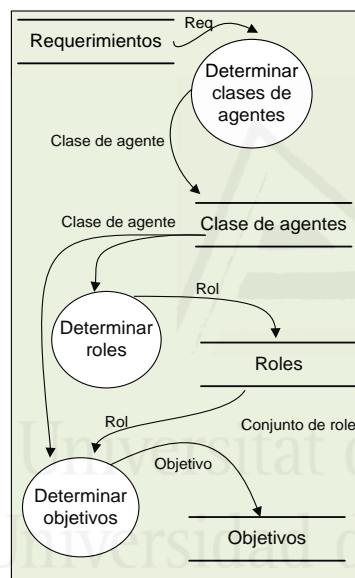


Figura 2.8. Diagrama de flujo de datos entre las tareas de la fase de análisis

La fase de análisis puede ser resumida como un conjunto de tres tareas donde cada una de ellas tiene una entrada de datos y proporciona unas salidas que son utilizadas por la siguiente tarea.



En este caso, la tarea de determinación de clases de agentes utiliza como entrada los requerimientos del dominio del problema, y proporciona una lista de clases de agentes. Seguidamente la tarea de determinación de roles utiliza dicha lista de clases de agentes, para obtener un conjunto de roles que debe implementar cada clase de agente. Y por último, la tarea de determinación de objetivos utiliza como entrada las clases de agentes y sus respectivos roles para determinar los objetivos de cada clase de agente. El flujo de datos entre las tareas que conforman la fase de análisis se muestra en la figura 2.8, cuyo diagrama de flujo de datos que utiliza la notación Yourdon/DeMarco (Yourdon and Constantine, 1975, DeMarco, 1979).

3.2. Fase de diseño

La fase de diseño, a partir de los objetivos y roles de las clases de agentes identificadas, se encarga de dar respuesta a la pregunta ¿Cómo?, es decir tiene la misión de definir la estructura o la organización. La estructura de un sistema multiagente se puede especificar en dos niveles. El primer nivel hace referencia a la estructura interna de cada agente y el segundo refleja las relaciones entre los agentes mostrando las posibles interacciones entre ellos. La distinción entre la organización “intraagente” e “interagente” es análoga a los dos niveles de abstracción que define la metodología BDI: “puntos de vista interno” y “punto de vista externo”.

La fase está compuesta por cuatro tareas, concretamente dos de ellas representan la organización interna del agente y las otras dos las relaciones entre los agentes. En primer lugar, se han de realizar las tareas relacionadas con la especificación de la organización interna del agente, ya que una vez definido esto, va a ser más sencillo definir las relaciones entre los diversos agentes. La figura 2.9 resume la naturaleza de las tareas que componen la fase de diseño.

La organización interna del agente se describe en primer lugar definiendo el tipo o modelo de agente (deliberativos, reactivos, BDI,...) que va a implementar a cada una de las clases de agentes identificadas. Una vez definidos los modelos de agente que van a dar lugar a cada una de las clases de agentes, se procede a definir los atributos y métodos que especifiquen los modelos de agentes elegidos. Este proceso queda resumido en las tareas: “Elección de tipos de agentes” y “Definición de atributos y métodos” respectivamente.



La organización de las relaciones entre los agentes se va a definir mediante dos tareas: “Elección de los tipos de relación entre agentes” y “Definición de los protocolos de interacción entre agentes”. De esta forma en primer lugar se determina el tipo de relación que se va a dar entre parejas de clases de objetos y posteriormente se definen los protocolos de interacción entre cada par de agentes o roles.

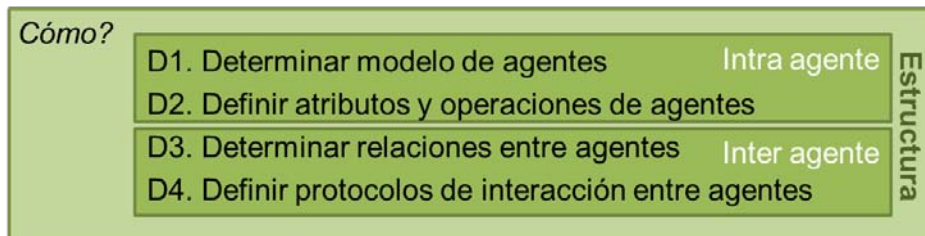


Figura 2.9 Tareas que componen la fase de diseño

3.2.1. Tarea D1. Determinación de modelo de agentes

El modelo de agente elegido para implementar cada una de las clases de agentes, obtenidas previamente, debe ser capaz de soportar los objetivos, roles, atributos y protocolos de interacción definidos para cada clase de agente.

El trabajo (Nwana, 1996) realiza una taxonomía de los distintos tipos de agente en función de sus atributos. En función de la movilidad del agente dentro de la red se encuentran los agentes estáticos y móviles. Finalmente, establece los siguientes tipos de agentes partiendo de la base de que todos son autónomos:

- Agentes Colaborativos.
- Agentes Interfaz.
- Agentes Móviles.
- Agentes de Información/Internet.
- Agentes Reactivos.
- Agentes Híbridos.
- Agentes Inteligentes.

La lista anterior presenta algunas carencias, ya que no contempla a los agentes deliberativos, BDI, ubicados, ni cognitivos. En base a (Wooldridge, 1999) la



lista anterior puede ser extendida con los agentes deliberativos y los de tipo BDI como un tipo concreto de agente híbrido. Los agentes ubicados (Weyns and Holvoet, 2004) se pueden considerar como aquellos agentes que están localizados en una zona concreta del entorno, siendo capaces de interactuar con él y con otros agentes. Los agentes cognitivos están equipados de memoria, que les permite recordar estados y realizar la toma de decisiones en base a sus recuerdos.

Existen diversos modelos de agentes que son válidos para implementar algunos tipos de agentes definidos previamente. Se diferencian dos familias de modelos de agentes: el modelo de agente ubicado y el modelo de agente BDI. Los modelos de agentes ubicados toman como base el trabajo de (Ferber and Müller, 1996) que establece el marco formal para los agentes reactivos y cognitivos; considera que los agentes producen influencias sobre el entorno donde están ubicados y el entorno reacciona a dichas influencias, actualizando su estado. Asimismo, se han desarrollado modelos a partir del anterior como los que proponen (Maciá, 2001), (Weyns and Holvoet, 2004) y (Ricci et al., 2010). Respecto al modelo de agentes BDI, el modelo principal corresponde a (Rao and Georgeff, 1991) que a su vez está basado en los principios marcados por (Bratman, 1987) y (Cohen and Levesque, 1990).

La elección del tipo y modelo de agente es determinante para el resto de tareas, sobre todo en la fase de implantación ya que el framework sobre el que se ejecutará al sistema multiagente ha de ser compatible con los modelos de agente elegidos. Los documentos resultantes de esta tarea son el resultado de añadir información sobre el tipo de agente elegido a cada una de las clases de agentes.

- Un documento que contenga el modelo de agente que dará origen al tipo de agente deseado indicando las clases de agentes que implementará cada modelo.

3.2.2. Tarea D2. Definición de atributos y operaciones

La tarea de definición de atributos y operaciones tiene el objetivo de definir, para cada una de las clases de agentes, los atributos coherentemente con el modelo de agente elegido en la tarea anterior. Los atributos representan el estado interno del agente y las operaciones o métodos permiten cambiar su estado o



decidir las acciones a realizar en función de sus objetivos, estado interno y percepción del entorno. Los atributos que se definan han de ser especificados utilizando tipos de datos básicos, para que no condicionen la elección de una tecnología en futuras tareas. Asimismo, la elección de los atributos y operaciones depende del modelo de agente elegido, ya que cada uno define los atributos u operaciones necesarias para desarrollar correctamente su cometido. Por ejemplo, si se decide utilizar el modelo de agente BDI para una clase concreta, entonces se han de definir los atributos necesarios para representar las creencias, los objetivos y los planes asociados a la consecución de los objetivos. Esto muestra la importancia de elegir correctamente el modelo de agente, ya que condiciona notablemente al resto de tareas.

Los documentos resultantes de esta tarea son el resultado de añadir información sobre los atributos y los métodos a cada una de las clases de agentes.

- Diagramas de clases de agentes complementados con los atributos y operaciones que cada clase de agente ha de implementar.

3.2.3. Tarea D3. Elección de tipos de relaciones entre agentes

Esta tarea es la primera de las dos tareas que definen las relaciones entre las clases de agentes. El objetivo de dicha tarea es el de indicar si existe posibilidad de interacción entre las posibles parejas de clases de agentes y en el caso de que sea posible, se debe especificar el tipo de relación que puede darse entre ellos.

El trabajo (Castelfranchi, 1998) establece una clasificación de los distintos tipos de relaciones que se pueden dar entre agentes. Define el concepto de "interferencia" como la repercusión que tienen las acciones que ejerce un determinado agente sobre el mundo o sobre otro agente. Si las interferencias son negativas, entonces el agente habrá de adaptar su comportamiento para evitar el obstáculo que supone la acción realizada por otro agente o puede inducir al agente que ha realizado la interferencia para que dé marcha atrás. En ambos casos el tipo de relación se puede identificar como de "coordinación" o de "competición". En caso de que la interferencia sea positiva, se produce una relación de "delegación" o "cooperación", ya que el agente puede aprovechar el nuevo estado para realizar su cometido, o bien, puede inducir a otro agente para



que continúe realizando acciones que vayan en su beneficio. En función del instante en que las interferencias son detectadas se puede hablar de: coordinación o delegación reactiva, si reacciona después de percibir el obstáculo u oportunidad; o proactiva, si se anticipa a las posibles interferencias u oportunidades.

Por lo tanto para cada par de clases de agentes hay que identificar posibles relaciones de cooperación o de competición, en cualquier caso se pueden dar de forma reactiva o proactiva.

Los documentos resultantes de esta tarea son el resultado de crear un diagrama de interacción AUML, en el que se indique las dos clases de agentes y el tipo de interacción, sin llegar a especificar el intercambio de mensajes.

- Diagramas parciales de interacción entre clases de agentes.

3.2.4. Tarea D4. Definición de protocolos de interacción

Esta tarea tiene el objetivo de completar los diagramas de interacción que han sido definidos en la tarea D3, ya que en dicha tarea únicamente se ha identificado si existen relaciones entre pares de agentes y si es de tipo cooperación o de competición.

Los diagramas de interacción entre agentes siguen la nomenclatura definida por FIPA (FIPA, 2003). Aunque se pueden definir protocolos propios de interacción entre agentes, el estándar propuesto por FIPA identifica y define algunos de los protocolos de interacción más comunes y que por lo tanto pueden ser utilizados en la mayoría de las interacciones. La tabla 2.2 describe dichos protocolos de interacción.

Los documentos resultantes de esta tarea son los diagramas de interacción AUML completos.

- Diagramas de interacción entre clases de agentes completos .



Protocolo de interacción	Descripción
Request	Solicita una acción a otro agente
Request-when	Solicita una acción si se da una condición
Propose	Propone la realización de una acción
Propose-when	Al darse una condición, propone una acción
Query	Solicita información a otro agente
Contract-net	Solicita una acción a varios agentes y luego selecciona aquellas que considera óptimas
Iterated Contract-net	Versión iterada del protocolo contract-net
Brokering	Hace de intermediario entre un agente que quiere solicitar una acción a un conjunto de agentes
Recruiting	Es un tipo de brokering donde las respuestas van directamente al agente solicitante
Subscribe	Permite a un agente recibir información sobre sucesos de otros agentes
English Auction	Realiza el tipo de subasta inglesa
Deutch Auction	Realiza el tipo de subasta alemana

Tabla 2.2. Patrones de protocolos de interacción entre agentes definidos por FIPA

3.2.5. Resumen de la fase de diseño

La fase de diseño puede ser resumida como un conjunto de cuatro tareas donde cada una de ellas tiene una entrada de datos y proporciona unas salidas que son utilizadas por la siguiente tarea.

El resultado obtenido al final de la fase de diseño es un modelo del dominio del problema a solucionar. Dicho modelo es concebido como un sistema multiagente, que además de ser distribuido, escalable y genérico, está dotado de las características intrínsecas del conjunto heterogéneo de agentes que lo componen. Una vez que el modelo ha sido diseñado se puede pasar a la fase de implantación, cuyo cometido es el desarrollo e implantación del sistema multiagente para un problema específico en el contexto en el que vaya a realizar su cometido.



El diagrama de flujo de datos de la figura 2.10 muestra las cuatro tareas que componen la fase de diseño, los datos que toman como entrada y los que generan.

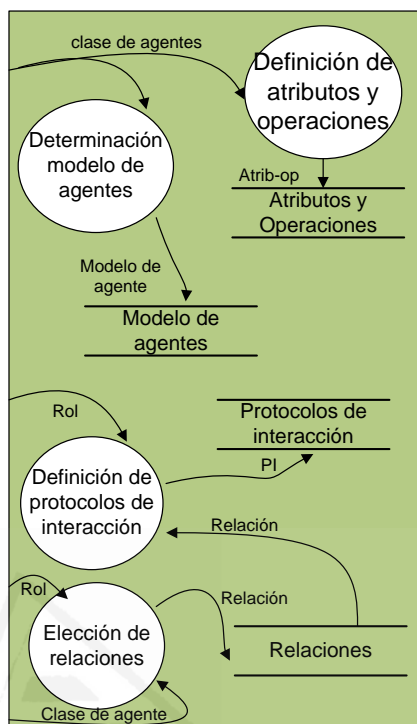


Figura 2.10. Diagrama de flujo de datos de la fase de diseño

3.3. Fase de implantación

La fase de implantación es la fase tecnológica y se encarga de desarrollar la solución de acuerdo a una tecnología concreta, por lo tanto responde a la pregunta ¿Cuál?, es decir, cual es la tecnología apropiada para implementar el modelo obtenido en las fases anteriores. Presenta el objetivo genérico de implementar el modelo de sistema multiagente sobre una tecnología concreta y particularizarlo para el problema que se pretende solucionar, validarlo e implantarlo. Para conseguir esto, en primer lugar se debe implementar el modelo



de sistema multiagente sobre uno de los frameworks específicos de sistema de agentes. En segundo lugar se deben instanciar los agentes necesarios de cada clase de agentes y asignar valor a sus respectivos parámetros de acuerdo al problema particular a resolver. Y en tercer lugar, se debe validar el comportamiento del sistema multiagente gracias a simulación y por la puesta en marcha del sistema multiagente en el contexto para el que ha sido creado. Estos objetivos determinan las tareas que componen la fase de implantación. La primera tarea “prototipado del modelo” consiste en evaluar los distintos frameworks existentes en el mercado que puedan albergar al modelo de sistema multiagente diseñado, elegir el conveniente y crear las clases de agentes para dicho framework. Esto último se corresponde con el modelo dependiente de la plataforma que define el paradigma MDA. La siguiente tarea “particularización” se encarga de definir las instancias de cada una de las clases de agentes definidas en el framework y asignar los valores adecuados a sus parámetros para representar un problema particular de todos los que abarca. La tercera tarea “validación” se encarga de validar el sistema multiagente creado para verificar el correcto funcionamiento antes de implantarlo. La cuarta, y última tarea “despliegue” consiste en implantar el sistema multiagente en el contexto donde va a desempeñar su cometido. La figura 2.11 resume las tareas que componen la fase de implantación.

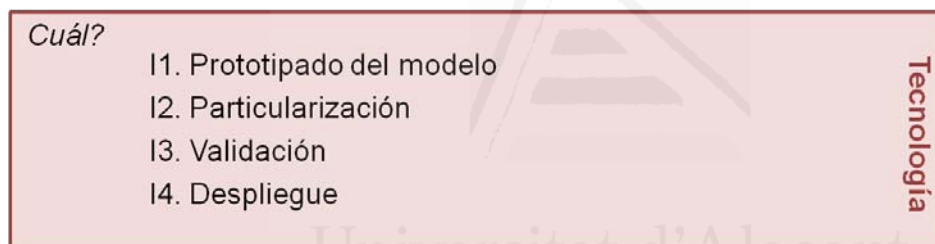


Figura 2.11. Tareas que componen la fase de implantación

3.3.1. Tarea I1. Prototipado del modelo

La primera tarea de la fase de implantación se encarga de analizar los distintos frameworks capaces de dar soporte a sistemas de agentes y elegir el framework conveniente en función de los modelos de agentes elegidos en la tarea D1.



La revisión realizada por (Huhns and Stephens, 1999) de los sistemas multiagente, enuncia que el principal cometido de los frameworks es que proporcionan la infraestructura necesaria que permite a los agentes comunicarse entre ellos. Además, dicho trabajo señala algunos de los aspectos que deben proporcionar los frameworks: protocolos de interacción, servicio de directorio, protocolos de mensajes, servicios de seguridad (autenticación) y operaciones de servicio auxiliar (almacén de datos).

El trabajo de (Weyns et al., 2005) analiza los diversos entornos de ejecución de agentes, en función de los mecanismos de comunicación entre agentes, su relación con el entorno, y metodologías orientadas a agentes.

El modelo de referencia de plataforma de agentes (FIPA, 2002) establece un sistema de intercambio directo de mensajes entre los agentes. Existen diversos frameworks que son compatibles con el estándar FIPA: JADE (Bellifemine and Rimassa, 2001), JADEX (Pokahr et al., 2005), Zeus (Nwana et al., 1999). En cambio JACK (Howden et al., 2001) no es compatible con dicho estándar y está orientado a la utilización de agentes BDI, al igual que JADEX, ya que es una extensión de JADE que permite incluir agente BDI en las plataformas de agentes.

El trabajo de (Shakshuki et al., 2004) compara los JADE, ZEUS y JACK utilizando unas pruebas de evaluación, que son implementadas en cada framework para medir y comparar tiempos de respuesta. Las conclusiones extraídas del análisis realizado sugieren el uso de JADE cuando los agentes se encuentran ubicados en una única plataforma y JACK cuando se encuentran distribuidos en diversas plataformas.

Además de los frameworks anteriores existen otros muchos, aunque el que mayor repercusión ha tenido en el ámbito académico es JADE. Está desarrollado en JAVA e incluye una serie de clases que permiten el prototipado rápido de agentes, proporcionando los servicios necesarios para la ejecución de los agentes: envío directo de mensajes utilizando el lenguaje de comunicación de agentes FIPA-ACL; protocolos de interacción; servicio de directorio o páginas amarillas distribuidas entre plataformas; y servicio de nombrado único de agentes. El framework permite definir grupos de "contenedores", donde se integran los agentes. Los contenedores se agrupan en "plataformas", de tal modo que la plataforma proporciona los servicios de forma transparente a los agentes. Se pueden instalar varias plataformas en una o en varios nodos de computación con el fin de distribuir la carga computacional.



Una vez que se ha elegido el framework de ejecución, es conveniente desarrollar cada una de las clases de agentes definidas en las tareas anteriores sobre dicho framework. Una vez creadas los tipos de agentes en el framework, posteriormente se pueden instanciar dando valor a sus parámetros.

Al concluir esta tarea se deben obtener los siguientes resultados:

- Framework de ejecución de agentes instalado y puesto en marcha.
- Desarrollo de cada una de las clases de agentes instaladas en el framework.

3.3.2. Tarea I2. Particularización

Las clases de agentes desarrolladas sobre el framework de ejecución específico permiten abordar el problema concreto a solucionar, para ello se ha de analizar dicho problema e instanciar el correspondiente número de clases de agentes con el fin de representar completamente dicho problema y, por tanto, su solución. Una vez definidas todos los agentes que compondrán el sistema multiagente, se deben dar los valores adecuados al problema a solucionar a cada uno de los parámetros que definen a los agentes.

La definición del modelo basado en agentes como clases de agentes para un framework específico, es que permite instanciar dicho modelo para resolver un problema particular, obteniendo el sistema multiagente para dicho caso. Por lo que para abordar futuros casos concretos, que estén contemplados en el modelo, no hay que repetir todo el proceso sino que se puede comenzar directamente desde esta etapa. Por ello es conveniente desarrollar alguna herramienta que permita prototipar sistemas multiagente de forma semiautomatizada a partir de los valores de los parámetros de cada tipo de agente.

El resultado al concluir esta tarea es:

- El sistema multiagente desarrollado para el caso particular a resolver sobre el framework elegido.

3.3.3. Tarea I3. Validación

El objetivo de la tarea de validación es determinar el comportamiento del sistema multiagente para el problema concreto y verificar si se corresponde con el



esperado. En el caso de que el comportamiento sea coherente, se pasará a la siguiente tarea, I4. En caso contrario, se debe determinar la naturaleza del error, que se puede dar principalmente a dos niveles en función de en qué tarea se haya cometido el error. El primer tipo de error se puede dar en la tarea de particularización, en este caso el problema se debe a que no se han asignado los valores correctos a alguno de los parámetros de los agentes, por lo que habría que asignar valores más apropiados. El segundo tipo de error puede derivar de algún error de diseño durante la fase de diseño o incluso, en caso más extremos, en la de análisis. En este caso subsanar el error va a requerir más esfuerzos, ya que hay que remontarse a la respectiva tarea y a partir de ella volver a realizar las sucesivas tareas hasta alcanzar la tarea de validación, y que daría lugar a otra revisión del sistema multiagente. La validación del sistema multiagente se concibe mediante simulaciones de las entradas o percepciones de los agentes y se observa que el comportamiento tanto de cada agente, como del conjunto de agentes sea el esperado. Es conveniente definir los datos de entrada a las simulaciones y los datos esperados, para poder realizar las comprobaciones de forma automatizada, al estilo de las pruebas unitarias para sistemas multiagente definidas en (Poutakidis et al., 2009).

De forma general, la simulación permite realizar validaciones de forma prematura, siendo capaz de detectar errores antes de que el sistema se ponga en producción. Esto repercute de forma directa en que se necesitan menos recursos para subsanar los errores, se disminuye el tiempo necesario de reparación y se asegura que el producto en fase de producción garantice unas funcionalidades mínimas. De hecho, el capítulo tercero de la tesis (Azorin-Lopez, 2007), que trata sobre la simulación computacional en el ámbito científico, concibe la simulación como un método de "validación sistemático, flexible y de bajo coste sin necesidad de recurrir a una experimentación preliminar sobre prototipos físicos". Por lo tanto la frontera entre la simulación y la experimentación física se vuelve un tanto difusa, ya que la simulación puede ser concebida como una etapa, que bien puede ser previa o sustituir, a la experimentación empírica propiamente dicha.

En el caso de que la validación sea satisfactoria y, por tanto, no sea necesario subsanar ningún error, esta tarea proporciona el siguiente documento:

- Informe que muestre los resultados de las simulaciones realizadas.

En el caso contrario, de que se detecte algún error y después de haberlo subsanado se producirá los siguientes documentos:



- Informe que muestre los resultados de las simulaciones realizadas.
- Una nueva versión del sistema multiagente.
- Si fuera necesario se deben revisar los documentos que contienen el diseño del modelo de sistema multiagente, reflejando los cambios realizados en cada uno de los documentos que se generan en tareas, que se han vuelto a realizar.

3.3.4. Tarea I4. Despliegue

La tarea de despliegue consiste en utilizar el sistema multiagente, que se ha obtenido como resultado de la tarea de validación, y que por lo tanto, está validado y verificado de forma preliminar, para integrarlo en el contexto donde va a desempeñar sus funciones. Es decir, consiste en ponerlo en fase de producción. Alcanzado este punto, es posible que el sistema multiagente tenga que ser calibrado para que se adapte totalmente a las condiciones reales de funcionamiento, ya que la simulación es improbable que recoja todos los aspectos que se han de tener en cuenta, por lo que es aconsejable que en esta tarea se haga refinamiento de los valores de los parámetros obtenidos de la simulación.

El resultado de esta tarea y en consecuencia de la fase de implantación y del método por completo es:

- El sistema multiagente desplegado sobre el entorno real y calibrado acorde a las condiciones reales de funcionamiento.
- Un Informe que muestre los resultados del despliegue y calibración en el entorno real.

3.3.5. Resumen de la fase de implantación

La fase de implantación se encarga de aplicar el modelo genérico diseñado en la fase anterior y aplicarlo sobre una tecnología concreta, que permita asignar los correspondientes valores a los parámetros del modelo para representar el problema concreto a solucionar. Incluye mecanismos de validación que permite verificar tanto el modelo como la solución particular al problema a solventar. La figura 2.12 muestra el flujo de datos entre las tareas que componen dicha fase.

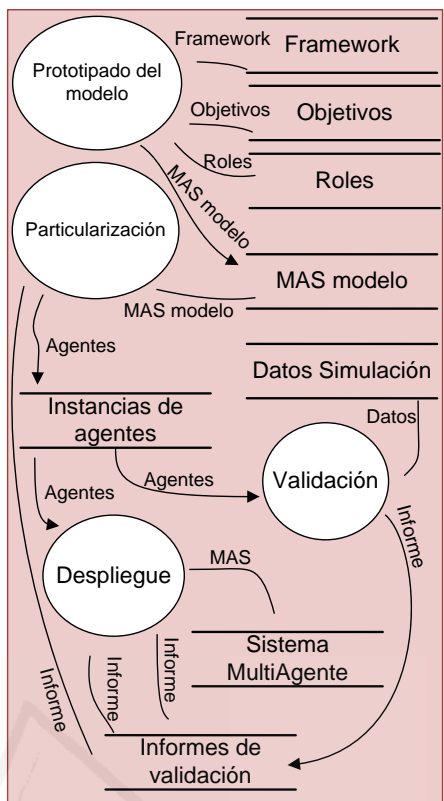


Figura 2.12. Flujo de datos de las tareas que componen la fase de implantación

3.4. Resumen de la metodología FET

Para concluir el capítulo, se procede a resumir la metodología funcionalidad-estructura y tecnología, para el modelado y desarrollo de sistemas multiagente. Está basada en los conceptos que propone el paradigma de arquitecturas dirigidas por modelos y el método de diseño de arriba hacia abajo diferenciando entre funcionalidad, estructura y tecnología. De esta forma se concibe un modelo genérico e independiente de cualquier tecnología, que permite solucionar el conjunto de problemas que el modelo es capaz de representar. Se puede crear una instancia del modelo de sistema multiagente independiente de cualquier tecnología para un framework concreto de ejecución de agentes. Así es posible prototipar de forma rápida, creando instancias y dando valor a los parámetros.



Análisis	<p><i>Qué?</i></p> <p>A1. Determinar clases de agentes A2. Determinar roles A3. Determinar objetivos</p>	Función
	<p><i>Cómo?</i></p> <p>D1. Determinar modelo de agentes Intra agente D2. Definir atributos y operaciones de agentes D3. Determinar relaciones entre agentes Inter agente D4. Definir protocolos de interacción entre agentes</p>	Estructura
Implantación	<p><i>Cuál?</i></p> <p>I1. Prototipado del modelo I2. Particularización I3. Validación I4. Despliegue</p>	Tecnología

Figura 2.13. Resumen de las fases y tareas que componen el método FET

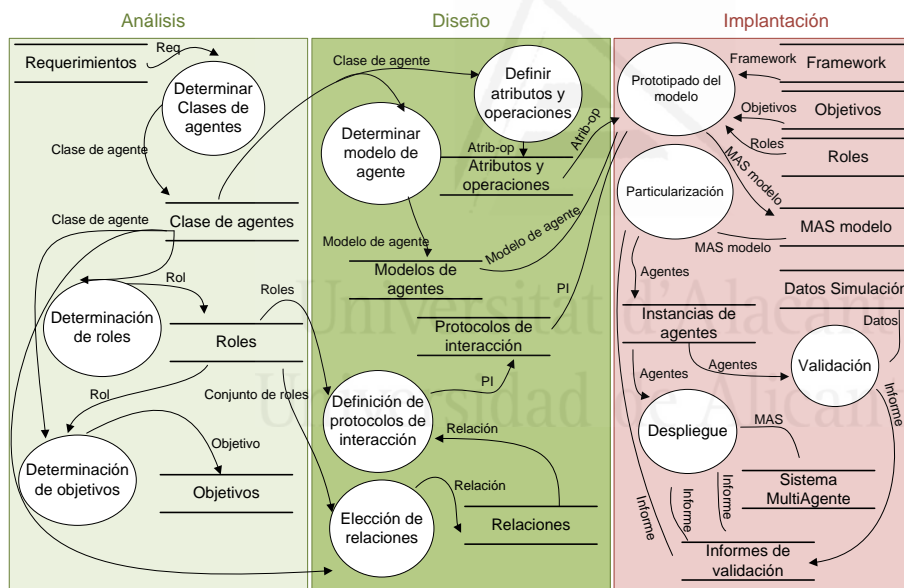


Figura 2.14. Flujo de datos entre las tareas que componen la metodología



Tal y como refleja la figura 2.13, la metodología está basada en definir el modelo –verde- y en desarrollar el sistema multiagente –rojo-. Para ello se han definido tres fases: análisis, que responde a la pregunta ¿Qué?; diseño, que responde a la pregunta ¿Cómo?; e implantación, que responde a la pregunta ¿Cuál tecnología? Cada una de las fases está compuesta por varias tareas, donde los datos de salida de cada tarea representan la entrada de la siguiente, permitiendo la realización de ciclos al detectarse errores en la tarea de validación. El flujo de datos entre las tareas que conforman las fases y que a su vez componen la metodología está representado por la figura 2.14.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Referencias

- (Azorin-Lopez, 2007) Azorin-Lopez, J. (2007) Modelado de sistemas para visión de objetos especulares. Inspección visual automática en producción industrial. *Tecnología Informática y Computación*. Alicante, University of Alicante.
- (Bauer et al., 2001) Bauer, B., Muller, J., Odell, J., Ciancarini, P. and Wooldridge, M. (2001) Agent UML: A Formalism for Specifying Multiagent Software Systems Agent-Oriented Software Engineering. Springer Berlin / Heidelberg.
- (Bellifemine and Rimassa, 2001) Bellifemine, F. and Rimassa, G. (2001) Developing multi-agent systems with a FIPA-compliant agent framework. *Softw. Pract. Exper.*, 31, 103-128.
- (Bratman, 1987) Bratman, M. (1987) *Intention, Plans, and Practical Reason*, Harvard University Press.
- (Bresciani et al., 2004) Bresciani, P., Giorgini, P., Giunchiglia, F., Mylopoulos, J. and Perini, A. (2004) TROPOS: An Agent-Oriented Software Development Methodology. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2, 203-236.
- (Brooks, 1991) Brooks, R. A. (1991) Intelligence without representation. *Artif. Intell.*, 47, 139-159.



- (Castelfranchi, 1998) Castelfranchi, C. (1998) Modelling social action for AI agents. *Artificial Intelligence*, 103, 157-182.
- (Cervenka, 2003) Cervenka, R. (2003) Modeling Notation Source MESSAGE. Foundation for Intelligent Physical Agents.
- (Cohen and Levesque, 1990) Cohen, P. R. and Levesque, H. J. (1990) Intention is choice with commitment. *Artificial Intelligence*, 42, 213-261.
- (Cossentino, 2008) Cossentino, M. (2008) From Requirements to Code with PASSI Methodology. IN Sugumaran, V. (Ed.) *Intelligent Information Technologies: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*., IGI Global.
- (DeLoach et al., 2004) DeLoach, S., Bergenti, F., Gleizes, M.-P. and Zambonelli, F. (2004) The MaSE Methodology Methodologies and Software Engineering for Agent Systems. IN Weiss, G. (Ed.). Springer US.
- (DeMarco, 1979) DeMarco, T. (1979) Structured analysis and system specification. *Classics in software engineering*. Yourdon Press.
- (Durfee, 1999) Durfee, E. H. (1999) Distributed Problem Solving and Planning. IN Weiss, G. (Ed.) *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence*The MIT Press.
- (Ferber and Müller, 1996) Ferber, J. and Müller, J. P. (1996) Influences and Reaction: a Model of Situated Multiagent Systems. Proceedings of the 2th Conference on Multi-agent Systems. Japan, AAAI Press.
- (FIPA, 2002) FIPA (2002) <http://www.fipa.org/repository/standardspecs.html> Lasta access on 06/12/2011.
- (FIPA, 2003) FIPA (2003) FIPA Modeling: Interaction Diagrams. Foundation for Intelligent physical agents.



- (Fowler and Scott, 2004) Fowler, M. and Scott, K. (2004) *UML distilled : Applying the standard object modeling language*, Addison-Wesley. 0-321-19368-7.
- (Genesereth and Nilsson, 1987) Genesereth, M. R. and Nilsson, N. J. (1987) *Logical foundations of artificial intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers Inc. . 0-934613-31-1.
- (Howden et al., 2001) Howden, N., Rönnquist, R., Hodgson, A. and Lucas, A. (2001) JACK Intelligent Agents-Summary of an Agent Infrastructure. *Proc.of the 5th ACM Int.Conf. on Autonomous Agents*.
- (Huhns and Stephens, 1999) Huhns, M. N. and Stephens, L. M. (1999) Multiagent Systems and Societies of Agents IN Weiss, G. (Ed.) *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence* The MIT Press.
- (Iglesias et al., 1998) Iglesias, C. A., Garijo, M., Centeno-Gonzalez, J. and Velasco, J. R. (1998) Analysis and Design of Multiagent Systems Using MAS-Common KADS. *Proceedings of the 4th International Workshop on Intelligent Agents IV, Agent Theories, Architectures, and Languages*. Springer-Verlag.
- (Jennings et al., 1998) Jennings, N. R., Sycara, K. and Wooldridge, M. (1998) A Roadmap of Agent Research and Development. *Int. Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1, 7-38.
- (Kinny et al., 1996) Kinny, D., Georgeff, M. P. and Rao, A. S. (1996) A methodology and modelling technique for systems of BDI agents. *Lecture Notes in Computer Science*, 1038, 56–71.
- (Maciá, 2001) Maciá, F. (2001) Modelos de Administración de Redes Heterogéneas de Computadores. Sistema de Regeneración de Nodos de Red. *Tecnología Informática y Computación*. Alicante, Universidad de Alicante.



- (Ngatchou et al., 2005) Ngatchou, P., Anahita, Z. and El-Sharkawi, M. A. (2005) Pareto Multi Objective Optimization. *Intelligent Systems Application to Power Systems, 2005. Proceedings of the 13th International Conference on.*
- (Nwana, 1996) Nwana, H. S. (1996) Software Agents: An Overview. *Knowledge Engineering Review, 11, 1-40.*
- (Nwana et al., 1999) Nwana, H. S., Ndumu, D. T., Lee, L. C. and Collis, J. C. (1999) Zeus: A toolkit for building distributed multiagent systems. *Applied Artificial Intelligence, 13, 129-185.*
- (Odell et al., 2000) Odell, J., Arbor, A. and Bauer, B. (2000) Extending UML for Agents. *Group, 1001, 1-15.*
- (Padgham and Winikoff, 2002) Padgham, L. and Winikoff, M. (2002) Prometheus: a methodology for developing intelligent agents. *Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 1.* Bologna, Italy, ACM.
- (Pokahr et al., 2005) Pokahr, A., Braubach, L., Lamersdorf, W., Bordini, R., Dastani, M., Dix, J. r. and Fallah Seghrouchni, A. (2005) Jadex: A BDI Reasoning Engine Multi-Agent Programming. IN Weiss, G. (Ed.). Springer US.
- (Poutakidis et al., 2009) Poutakidis, D., Winikoff, M., Padgham, L., Zhang, Z., El Fallah Seghrouchni, A., Dix, J., Dastani, M. and Bordini, R. H. (2009) Debugging and Testing of Multi-Agent Systems using Design Artefacts. Multi-Agent Programming. Springer US.
- (Rao and Georgeff, 1991) Rao, A. S. and Georgeff, M. P. (1991) Modeling rational agents within a BDI-architecture. IN Allen, J., Fikes, R. and Sandewall, E. (Eds.) *Readings in agents.* Morgan Kaufmann.
- (Ricci et al., 2010) Ricci, A., Viroli, M., Piunti, M., Braubach, L., Briot, J.-P. and Thangarajah, J. (2010) Formalising the Environment in MAS Programming:



- A Formal Model for Artifact-Based Environments. Programming Multi-Agent Systems. Springer Berlin / Heidelberg.
- (Shakshuki et al., 2004) Shakshuki, E., Jun, Y., Orchard, B., Yang, C. and Ali, M. (2004) Multi-agent Development Toolkits: An Evaluation. Innovations in Applied Artificial Intelligence. Springer Berlin / Heidelberg.
- (Tran et al., 2003) Tran, Q.-N., Low, G., Williams, M.-A., Zhong, N., Ras, Z., Tsumoto, S. and Suzuki, E. (2003) A Feature Analysis Framework for Evaluating Multi-agent System Development Methodologies. Foundations of Intelligent Systems. Springer Berlin / Heidelberg.
- (Tran et al., 2005) Tran, Q. N. N., Low, G. and Williams, M. A. (2005) A preliminary comparative feature analysis of multi-agent systems development methodologies. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*.
- (Weyns and Holvoet, 2004) Weyns, D. and Holvoet, T. (2004) A Formal Model for Situated Multi-Agent Systems. *Fundam. Inf.*, 63, 125-158.
- (Weyns et al., 2005) Weyns, D., Parunak, H. V., Michel, F., Holvoet, T. and Ferber, J. (2005) Environments for Multiagent Systems, State-of-the-Art and Research Challenges. *Post-proceedings of the First International Workshop on Environments for Multiagent Systems*.
- (Wood, 2000) Wood, M. F. (2000) Multiagent Systems Engineering: A Methodology For Analysis And Design Of Multiagent Systems. *Air Force Institute of Technology*. USA.
- (Wooldridge, 1999) Wooldridge, M. (1999) Intelligent Agents. IN Weiss, G. (Ed.) Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Modern Approach to Artificial Intelligence. The MIT Press.



(Wooldridge and Jennings, 1995) Wooldridge, M. and Jennings, N. (1995) Agent theories, architectures, and languages: A survey Intelligent Agents. Springer Berlin / Heidelberg.

(Wooldridge et al., 2000) Wooldridge, M., Jennings, N. R. and Kinny, D. (2000) The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 3, 285-312.

(Yourdon and Constantine, 1975) Yourdon, E. and Constantine, L. (1975) *Structured Design*, New York: YOURDON Press.

(Zambonelli et al., 2003) Zambonelli, F., Jennings, N. R. and Wooldridge, M. (2003) Developing multiagent systems: The Gaia methodology. *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, 12, 317-370.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Capítulo tres

Modelado de Sistemas Eléctricos

El capítulo describe el modelo formal recogido en la metodología. El modelo formal está compuesto por el modelo funcional y el estructural. El primero contiene información acerca de las clases de agentes, roles y objetivos. En cambio, el estructural describe tanto la organización interna del agente como la externa, es decir, la que se da entre los agentes. Dentro de la organización interna, se analizan diversos modelos de agente y se detallan los modelos de entorno, agente y sistema multiagente propuestos. Seguidamente, se especifica la organización entre los agentes a través de los tipos de relación y los protocolos de interacción entre cada pareja de clases de agentes.



1. Introducción

Una vez establecida en el capítulo anterior la metodología para el modelado y desarrollo de sistemas multiagente es conveniente especificar el modelo de sistema multiagente para el contexto de la distribución eléctrica aplicando dicha metodología a la propuesta de solución. La metodología contempla el modelado y desarrollo de sistemas multiagente mediante las fases de análisis, diseño e implantación. De acuerdo a la propuesta de solución, se pretende definir de forma general el modelo independiente, estando formado por los modelos funcional y estructural obtenidos respectivamente de las fases de análisis y diseño de la metodología. Únicamente se definen los modelos referidos a las dos primeras fases, ya que el modelo tecnológico perteneciente a la fase de implantación, al hacer referencia a la tecnología de desarrollo, queda fuera del ámbito del modelo independiente, por lo que será abordada en capítulos posteriores. La figura 3.1 rememora la propuesta de solución mostrada en la figura 1.14; donde se muestran las fases que componen la metodología desarrollada en el capítulo anterior resaltando los modelos que van a ser definidos a lo largo del presente capítulo. El modelo funcional tiene la misión de describir las funcionalidades y los objetivos de cada una de las clases de agentes que van a componer el modelo. En cambio, el modelo estructural hace referencia a las relaciones entre agentes y a la organización interna de los agentes.



Figura 3.1 Tipos de modelos de acuerdo a la propuesta de solución basada en la metodología FET



2. Modelo funcional

El modelo funcional, que hace referencia a la fase de análisis, agrupa la información obtenida de cada una de las tareas que componen la fase de análisis. Su principal cometido es describir la funcionalidad de cada una de las clases de agentes que conforman el modelo aunque para ello es necesario determinar previamente dichas clases. De la citada tarea se infiere parcialmente la organización de los tipos de agentes que componen el modelo. Aunque cada tipo de modelo, y por tanto de fases, intenta establecer límites entre funcionalidad, organización y tecnología dichos límites se vuelven difusos, presentando cierto grado de acoplamiento entre ellos, de forma que las transiciones se producen de forma gradual permitiendo la coherencia y complementariedad a lo largo de los distintos modelos.

2.1. Clases de agentes

En primer lugar, una de las tareas que mayor repercusión tiene sobre el modelo resultante es “determinar las clases de agentes” ya que se van a identificar los tipos o categorías de agentes que condicionarán la forma de representar los escenarios particulares a resolver. Aplicando el método descrito en el capítulo anterior, concretamente en el punto 3.1.1, para el caso del contexto de sistemas de distribución eléctrica, *SMADE*, está compuesto por un conjunto finito de agentes, α_i , del que se desconoce tanto el tipo de agentes como su cardinalidad, que se establece en n . Tal y como muestra la ecuación 3.1.

$$\begin{aligned} SMADE &\equiv \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\} \\ Card(SMADE) &= n \end{aligned} \tag{3.1}$$

Se define la relación de equivalencia, R_f , donde dos elementos del conjunto de agentes *SMADE* están relacionados mediante la relación de equivalencia, R_f , definida sobre *SMADE*, si “los agentes admiten aristas con el mismo patrón de flujo”. Tal y como define la ecuación 3.2.



$$R_f = \{(x, y) : x, y \in SMADE \wedge$$

"x e y admitan aristas con el mismo patrón de flujo"\}

3.2

Se define el patrón de flujo de las aristas de un agente como el conjunto de sentidos que pueden tomar las aristas que permiten el intercambio de energía eléctrica con ese agente. Se puede representar por la agregación del flujo de entrada y de salida, indicando respectivamente si existe flujo de entrada de energía al agente; y si existe flujo de salida hacia otro agente. Por lo tanto, el patrón de flujo se puede representar con dos bits, siendo el de entrada el de mayor peso y el de salida el de menor. Asimismo, el patrón de flujo tiene la forma $x.f_{io}$, siendo los posibles valores: 00, 01, 10, 11.

El patrón de flujo eléctrico $x.f_{io} = 00$ se da en aquellos nodos que no tienen propiedades eléctricas o son insuficientes, y que por lo tanto no tienen capacidad para ser conectados con aristas de entrada ni de salida. El patrón de flujo $x.f_{io} = 10$ hace referencia a los agentes que no tienen capacidad para conectar aristas de salida y si tienen capacidad para conectar aristas de entrada. El patrón de flujo $x.f_{io} = 01$ se da en los agentes que no tienen capacidad para conectar aristas de entrada y si la tienen de para las de salida. Por último, el patrón de flujo $x.f_{io} = 11$ hace referencia a los agentes que tienen capacidad para conectar aristas de entrada y de salida.

La relación binaria R_f es una relación de equivalencia en $SMADE$, ya que cumple las propiedades reflexiva, simétrica y transitiva. Es reflexiva porque x admite aristas con el mismo patrón de flujo que x . Es simétrica porque si x e y admiten aristas con el mismo patrón de flujo, entonces también sucede a la inversa. Es transitiva porque si x e y admiten aristas con el mismo patrón de flujo, y y y z admiten aristas con el mismo patrón de flujo, entonces x y z también admiten aristas con el mismo patrón de flujo.

A partir de R_f se puede obtener el conjunto cociente $R_f/SMADE$ donde se determinan el conjunto de clases de equivalencia sobre $SMADE$ al aplicar R_f . El número de clases de equivalencia está determinado por el número posibles valores que puede tomar el patrón de flujo. Siendo este número el resultado de 2^2 , representando la base el número de dígitos que componen el patrón y el exponente el número de valores que pueden tomar cada uno. Por lo tanto, la clase de equivalencia es de orden finito, concretamente el orden es cuatro.



Se define la clase de equivalencia $[F]$, como la partición de $SMAD E$ formada por el conjunto de agentes cuyo patrón de flujo eléctrico es 01. El conjunto de agentes capaces de suministrar energía eléctrica. Ver ecuación 3.3.

$$[F] = \{x \in SMAD E / x. f_{io} = 01\} \quad 3.3$$

La clase de equivalencia $[T]$ es la partición de $SMAD E$ formada por el conjunto de agentes cuyo patrón de flujo eléctrico es 11, es decir son capaces de consumir y de suministrar energía eléctrica. Ver ecuación 3.4.

$$[T] = \{x \in SMAD E / x. f_{io} = 11\} \quad 3.4$$

La clase de equivalencia $[C]$ es la partición de $SMAD E$ formada por el conjunto de agentes cuyo patrón de flujo eléctrico es 10. El conjunto de agentes que requieren energía eléctrica. Ver ecuación 3.5.

$$[C] = \{x \in SMAD E / x. f_{io} = 10\} \quad 3.5$$

La clase de equivalencia $[S]$ es la partición de $SMAD E$ formada por el conjunto de agentes cuyo patrón de flujo eléctrico es 00. El conjunto de agentes que no son capaces ni de recibir ni de suministrar energía eléctrica. Ver ecuación 3.6.

$$[S] = \{x \in SMAD E / x. f_{io} = 00\} \quad 3.6$$

Tal y como muestra la figura 3.2, el conjunto inicial de agentes, $SMAD E$, se puede descomponer en los subconjuntos disjuntos definidos en cada una de las clases de equivalencia obtenidas al aplicar R_f . A partir de las cuatro clases de equivalencia anteriores se obtienen las siguientes clases de agentes.

F hace referencia a la clase de agentes con capacidad de suministrar potencia eléctrica, por lo que van a ser denominados agentes “fuentes de energía”.

C representa a la clase de agentes que requieren potencia eléctrica para desempeñar sus funcionalidades; se denominan agentes “centros de consumo”

T es capaz de recibir potencia eléctrica, manipularla y suministrarla en función de los requerimientos tanto de suministro como de necesidad. Esta concepción hace que asignando valores adecuados a los parámetros que definen a los agentes de tipo T sean capaces de representar a dispositivos tales como: cableado eléctrico, baterías de almacenamiento, transformadores, convertidores



de potencia (DC-DC, AC-DC, DC-AC, AC-AC), etc. Es decir, cualquier dispositivo capaz de recibir potencia eléctrica, manipular alguna de sus magnitudes, incluso en el tiempo, y suministrarla. La distinta naturaleza de los dispositivos tangibles que los agentes de tipo T son capaces de representar dificulta la elección de un término apropiado dentro del mundo empírico. Este hecho sugiere abstraer la naturaleza tangible de los dispositivos para buscar un término del mundo abstracto que los englobe por completo. Un ejemplo de término abstracto puede ser "intermediario". Debido a que la naturaleza del problema abordado se encuentra en el mundo tangible y los términos utilizados en las clases de agentes anteriores pertenecen al mundo empírico es conveniente utilizar un término empírico, siendo conscientes de sus carencias, se considera apropiado el término agente "transpondedor".

S representa dispositivos que no tienen capacidad de manipular energía eléctrica, por tanto hace referencia a la clase de agentes que proporcionan servicios para el funcionamiento del sistema multiagente y que por tanto pueden ofrecer servicios auxiliares al resto de agentes. Se denominan agentes "servicios"

La cardinalidad de cada uno de los respectivos subconjuntos, de momento, se desconoce, por lo que se establecen en F_n , T_n , C_n y S_n respectivamente resultando la suma el número total de agentes, n . Ver definiciones en 3.7.

$$SMADE \equiv \{F, T, C, S\}$$

$$F \equiv \{\alpha_{f1}, \alpha_{f2}, \dots, \alpha_{fn}\} / Card(F) = F_n$$

$$T \equiv \{\alpha_{t1}, \alpha_{t2}, \dots, \alpha_{tn}\} / Card(T) = T_n$$

$$C \equiv \{\alpha_{c1}, \alpha_{c2}, \dots, \alpha_{cn}\} / Card(C) = C_n$$

$$S \equiv \{\alpha_{s1}, \alpha_{s2}, \dots, \alpha_{sn}\} / Card(S) = S_n$$

$$F_n + T_n + C_n + S_n = n$$

3.7

A continuación, habría que buscar una nueva relación de equivalencia para cada una de las 4 clases de equivalencia obtenidas previamente. En el caso de las

⁴ La real academia española de la lengua define transpondedor como "aparato que emite una señal en una frecuencia determinada cuando lo estimula otra señal externa apropiada".



clases $[F], [T], [C]$ se ha alcanzado un nivel suficientemente genérico, para abarcar a los diversos tipos de dispositivos que representan cada clase de agente, y específico, como para poder definir de forma adecuada las características propias de cada clase de dispositivos. En cambio, la clase de equivalencia $[S]$ alberga a los agentes con capacidad de proporcionar servicios de cualquier tipo, por lo que no es suficientemente específica para determinar con exactitud el tipo de servicios que van a ofrecer. En este caso, se ha de definir una nueva relación de equivalencia para determinar las distintas clases de agentes que lo componen.

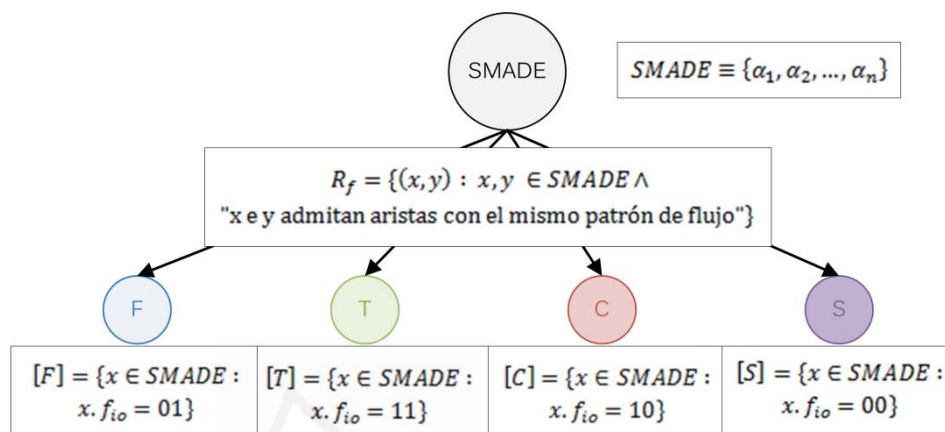


Figura 3.2 Taxonomía de las clases de agentes obtenidas al aplicar la relación de equivalencia R_f sobre el conjunto inicial de agentes SMADE

Se define la relación de equivalencia, R_s , donde dos elementos del conjunto de agentes pertenecientes a S están relacionados mediante la relación de equivalencia, R_s , definida sobre S , si "los agentes proporcionan servicios de la misma naturaleza". Tal y como define la ecuación 3.8

$$R_s = \{(x, y) : x, y \in S \wedge \text{"x e y proporcionan servicios de la misma naturaleza"}\} \quad 3.8$$

La relación binaria R_s es una relación de equivalencia en S , ya que cumple las propiedades reflexiva, simétrica y transitiva. A partir de R_s se puede obtener el conjunto cociente R_s/S donde se determinan el conjunto de clases de equivalencia sobre S al aplicar R_s . El número de clases de equivalencia está determinado por el número de posibles servicios que se quieran proporcionar. Así, cada clase de equivalencia se encarga de ofrecer unos servicios propios.



Se define la clase de equivalencia $[BA]$, como la partición de S formada por el conjunto de agentes que proporcionan “servicios de búsqueda de otros agentes” y de los servicios que proporciona cada agente. Ver ecuación 3.9.

$$[BS] = \{x \in S / x \text{ proporciona servicio búsqueda}\} \quad 3.9$$

La clase de equivalencia $[IU]$, como la partición de S formada por el conjunto de agentes que proporcionan “servicios de interfaz” para los actores del sistema. Ver ecuación 3.10.

$$[IU] = \{x \in S / x \text{ proporciona servicio interfaz}\} \quad 3.10$$

La clase de equivalencia $[OG]$, como la partición de S formada por el conjunto de agentes que proporcionan “servicios de optimización global” a todo el sistema multiagente. Ver ecuación 3.11.

$$[OG] = \{x \in S / x \text{ proporciona servicio optimización global}\} \quad 3.11$$

La clase de equivalencia $[SP]$, como la partición de S formada por el conjunto de agentes que proporcionan servicios de “simulación de potencia eléctrica” generada y consumida. Ver ecuación 3.12.

$$[SP] = \{x \in S / x \text{ proporciona servicio simulación de potencia}\} \quad 3.12$$

La clase de equivalencia $[PM]$, como la partición de S formada por el conjunto de agentes que proporcionan “servicios de predicción meteorológica”. Ver ecuación 3.13.

$$[PM] = \{x \in S / x \text{ proporciona servicio predicción meteorológica}\} \quad 3.13$$

El conjunto de agentes, S , se puede descomponer en los subconjuntos disjuntos definidos en cada una de las clases de equivalencia obtenidas al aplicar la relación de equivalencia R_s . A partir de las cinco clases de equivalencia anteriores se obtienen las siguientes clases de agentes.



BA agente de búsqueda de agentes, que ofrece al resto de agentes el servicio de búsqueda de otros agentes y/o de agentes concretos que ofrecen un determinado tipo de servicio.

IU agente interfaz de usuario, que proporciona a los usuarios mecanismos e interfaces para manipular el sistema de forma segura.

OG agente de optimización global, que ofrece el servicio de optimizar la distribución energética a partir de la solución obtenida previamente como consecuencia de las interacciones entre los agentes, teniendo en cuenta el sistema multiagente al completo.

SP agente de simulación de potencia, que ofrece el servicio de simular la capacidad de generación de energía eléctrica y de las necesidades de consumo eléctrico.

PM agente de predicción meteorológica, que obtiene y proporciona datos sobre previsiones meteorológicas que son utilizadas por el resto de clases de agentes, especialmente el agente *SP*.

$$S \equiv \{BA, IU, OG, SP, PM\}$$

$$BA \equiv \{\alpha_{BA1}, \alpha_{BA2}, \dots, \alpha_{BA_n}\} / Card(BA) = BA_n$$

$$IU \equiv \{\alpha_{IU1}, \alpha_{IU2}, \dots, \alpha_{IU_n}\} / Card(IU) = IU_n$$

$$OG \equiv \{\alpha_{OG1}, \alpha_{OG2}, \dots, \alpha_{OG_n}\} / Card(OG) = OG_n \quad 3.14$$

$$SP \equiv \{\alpha_{SP1}, \alpha_{SP2}, \dots, \alpha_{SP_n}\} / Card(SP) = SP_n$$

$$PM \equiv \{\alpha_{PM1}, \alpha_{PM2}, \dots, \alpha_{PM_n}\} / Card(PM) = PM_n$$

$$BA_n + IU_n + OG_n + SP_n + PM_n = S_n$$

La cardinalidad de cada uno de los respectivos subconjuntos, no puede ser determinada hasta que se creen las instancias necesarias de cada una de las clases de agentes conforme los requerimientos del problema concreto a resolver. Debido a este motivo, se establecen la cardinalidad para cada una de ellas en BS_n , IU_n , OG_n , SP_n y PM_n respectivamente. El sumatorio de dichas cardinalidades se corresponde con el número total de agentes, S_n . Tal y como se muestra en la definición 3.14.



2.1.1. Resumen de clases de agentes

Al aplicar las relaciones de equivalencia R_f y R_s sobre $SMADE$ y S respectivamente se obtienen, tal y como muestra la figura 3.3, las siguientes clases de equivalencia: $[F]$, $[T]$, $[C]$, $[BA]$, $[IU]$, $[OG]$, $[SP]$ y $[PM]$.

Agente	Naturaleza	Clase de equivalencia
Agente Fuente de Energía		$[F]$
Agente Transpondedor de Energía	Eléctrica	$[T]$
Agente Centro de Consumo de Energía		$[C]$
Agente de Búsqueda de Agentes		$[BA]$
Agente de Interfaz de Usuario		$[IU]$
Agente de Optimización Global	Servicios	$[OG]$
Agente de Simulación de Potencia		$[SP]$
Agente de Predicción Meteorológica		$[PM]$

Tabla 3.1 Clases de agentes que componen el sistema multiagente $SMADE$

Las clases de equivalencia obtenidas dan lugar a las distintas clases de agentes que van a componer el sistema multiagente para la distribución eléctrica $SMADE$. Dicha información se resume en la tabla 3.1 donde además se muestra la naturaleza de cada agente, quedando agrupados en agentes de naturaleza eléctrica y agentes que proporcionan servicios al resto de agentes.

$$SMADE \equiv \{F, T, C, BA, IU, OG, SP, PM\} \quad 3.15$$

Por último, se define el sistema multiagente, $SMADE$, como el conjunto de clases de agentes, mostradas en la ecuación 3.15, que pueden ser instanciadas para la representación de un sistema eléctrico particular cuya distribución eléctrica ha de ser planificada y gestionada.

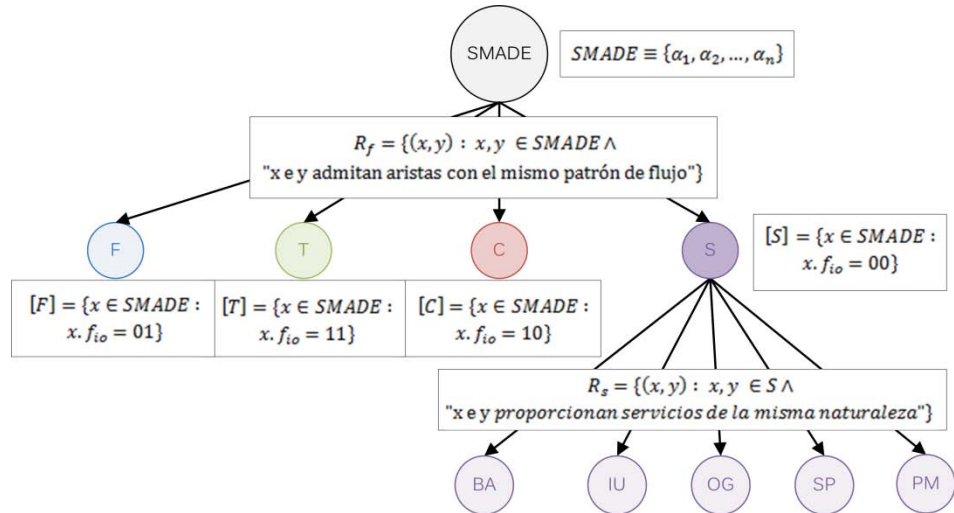


Figura 3.3 Taxonomía de las clases de agentes obtenidas al aplicar las relaciones de equivalencia R_f y R_s sobre $SMADE$ y S respectivamente

2.2. Roles

El objetivo de la tarea de determinación de roles permite obtener comportamientos comunes a varias clases de agentes, lo que permite aumentar la reusabilidad en futuras tareas de desarrollo y el nivel de detalle de cada clase de agente.

Esta tarea utiliza como entrada el conjunto de clases de agentes, $SMADE$, definido en la ecuación 3.15. Se pueden definir nuevas relaciones de equivalencia, sobre $SMADE$ que permitan relacionar a diversas clases de agentes de forma que la relación de equivalencia se puede considerar como el rol o comportamiento y las clases de agentes agrupadas bajo la misma clase de equivalencia serán las que contemplen dicho rol o comportamiento. Con el fin de maximizar la reusabilidad se pretende buscar relaciones de equivalencia que relacionen al mayor número de clases de agentes posibles.

La ecuación 3.16 define la relación de equivalencia, R_{prod} , donde dos elementos del conjunto de clases de agentes $SMADE$ están relacionados mediante la relación de equivalencia, R_{prod} , definida sobre $SMADE$, si el flujo eléctrico es de salida $x.f_{io} = X1$, es decir que representan a dispositivos que generan energía.



$$R_{prod} = \{(x, y) : x, y \in SMADE \wedge x.f_{io} = X1 \wedge y.f_{io} = X1\} \quad 3.16$$

La relación binaria R_{prod} es una relación de equivalencia en $SMADE$, ya que cumple las propiedades reflexiva, simétrica y transitiva. A partir de R_{prod} se puede obtener el conjunto cociente $R_{prod}/SMADE$ donde se determinan el conjunto de clases de equivalencia sobre $SMADE$ al aplicar R_{prod} .

Se define la clase de equivalencia $[Prod]$, como la partición de $SMADE$ formada por el conjunto de clases agentes que son capaces de producir energía eléctrica. Las clases de agentes relacionadas por R_{prod} son F y T , ya que presentan respectivamente los siguientes flujos eléctricos 01 y 11. Ver ecuaciones 3.19. El rol asociado a esta clase de equivalencia es el de productor de energía eléctrica.

$$[Prod] \equiv R_{prod}/SMADE \equiv \{x \in SMADE / x.f_{io} = X1\} \quad 3.17$$

$$Prod \equiv \{F, T\}$$

Una vez que se ha obtenido un rol compartido por varias clases de agentes, el proceso comienza de nuevo, de forma que se ha de buscar una nueva relación de equivalencia sobre el conjunto original $SMADE$.

Se define la relación de equivalencia, R_{con} , donde dos elementos del conjunto de clases de agentes $SMADE$ están relacionados mediante la relación de equivalencia, R_{con} , definida sobre $SMADE$, si el flujo eléctrico es de entrada $x.f_{io} = 1X$, es decir que representan a dispositivos que consumen energía. Ver ecuación 3.18.

$$R_{con} = \{(x, y) : x, y \in SMADE \wedge x.f_{io} = 1X \wedge y.f_{io} = 1X\} \quad 3.18$$

La relación binaria R_{con} es una relación de equivalencia en $SMADE$, ya que cumple las propiedades reflexiva, simétrica y transitiva. A partir de R_{con} se puede obtener el conjunto cociente $R_{con}/SMADE$ donde se determinan el conjunto de clases de equivalencia sobre $SMADE$ al aplicar R_{con} .

Se define la clase de equivalencia $[Con]$, como la partición de $SMADE$ formada por el conjunto de clases agentes que son capaces de consumir energía eléctrica. Las clases de agentes relacionadas por R_{con} son T y C , ya que presentan respectivamente los siguientes flujos eléctricos 11 y 10. Ver ecuaciones 3.19. El rol



asociado a esta clase de equivalencia es el de consumidor de energía eléctrica que requiere dicha energía para proporcionar sus funcionalidades.

$$[Con] \equiv R_{con}/SMADE \equiv \{x \in SMADE / x.f_{io} = 1X\} \quad 3.19$$

$$Con \equiv \{T, C\}$$

La siguiente relación de equivalencia a aplicar sobre $SMADE$, es, R_{serv} , donde dos elementos del conjunto de clases de agentes $SMADE$ están relacionados mediante la relación de equivalencia, R_{serv} , definida sobre $SMADE$, si "proporcionan servicios auxiliares a otros agentes". Ver ecuación 3.20.

$$R_{serv} = \{(x, y): x, y \in SMADE\} \quad 3.20$$

La relación binaria R_{serv} es una relación de equivalencia en $SMADE$, ya que cumple las propiedades reflexiva, simétrica y transitiva. A partir de R_{serv} se puede obtener el conjunto cociente $R_{serv}/SMADE$ donde se determinan el conjunto de clases de equivalencia sobre $SMADE$ al aplicar R_{serv} .

$$[Serv] \equiv R_{serv} / SMADE \equiv \{x \in SMADE / x \text{ proporciona servicios auxiliares}\} \quad 3.21$$

$$Serv \equiv \{BA, IU, OG, SP, PM\}$$

Se define la clase de equivalencia $[Serv]$, como la partición de $SMADE$ formada por el conjunto de clases agentes que proporcionan servicios auxiliares a otros agentes. Las clases de agentes relacionadas por R_{serv} son: BA , IU , OG , SP y PM , ya que dichas clases de agentes, que han sido determinadas a partir de R_s en la ecuación 3.8, proporcionan servicios de distinta naturaleza a otros agentes. Ver definición 3.21. Una misma clase de agente puede proporcionar diversos servicios, creando una instancia del rol $Serv$ por cada uno de los servicios a ofrecer. Las instancias del rol $Serv$ se denotan $Serv: servicioInstanciado$. Las instancias del rol $Serv$ de cada clase de agente serán definidas en las siguientes secciones del presente capítulo.

Dependiendo de los requerimientos y del ámbito del problema a resolver mediante el sistema multiagente se podría continuar identificando nuevos roles, con el fin de potenciar la modularidad. En cambio, el número de roles identificado y el número de clases de agentes que comparten cada uno de esos roles se consideran suficientes para el ámbito del problema abordado, por lo que la tarea



de identificación de roles se da por finalizada, dando paso a la identificación de objetivos.

2.2.1. Resumen de roles

Después de aplicar las relaciones de equivalencia R_{prod} , R_{con} , R_{rec} y R_{serv} sobre *SMADE*, se han obtenido 4 tipos de roles: *Gen* generador; *Con* consumidor; y *Serv* servicio.

Rol	Relación de equivalencia	Clases de agentes
Productor <i>Prod</i>	R_{prod}	<i>F, T</i>
Consumidor <i>Con</i>	R_{con}	<i>T, C</i>
Ofrecer Servicios <i>Serv</i>	R_{serv}	<i>BA, IU, OG, SP, PM,</i>

Tabla 3.2. Resumen de las clases de agentes asociados a los roles identificados

La tabla 3.2 recoge la información acerca de las clases de agentes asociadas a cada uno de los roles identificados a lo largo de la tarea de determinación de roles. Por su parte, la tabla 3.3 refleja la información inversa, es decir los roles que implementa cada una de las clases.

Clase de agente	Roles
<i>F</i>	<i>Prod</i>
<i>T</i>	<i>Prod, Con</i>
<i>C</i>	<i>Con</i>
<i>BA, IU, OG, SP, PM</i>	<i>Serv</i>

Tabla 3.3. Resumen de los roles que implementa cada una de las clases de agentes



2.3. Objetivos

Una vez que han sido identificadas las clases de agentes y los diferentes roles que deben implementar cada una de ellas, es pertinente describir los objetivos que van a guiar el comportamiento tanto de los roles como de las clases de agentes. Los objetivos de las clases de agentes se van a encargar de orquestar la ejecución de cada uno de los roles, otorgando distinta relevancia en cada momento, para que cada uno de los roles alcance sus propios objetivos.

En primer lugar se identifican los objetivos propios a cada uno de los roles, para seguidamente enunciar los propios a las clases de agentes, dicha información es resumida en la tabla 3.4 .

El rol *Prod* presenta los siguientes objetivos:

- *Prod₀₁* - Maximizar el producto de la energía eléctrica vendida y el coste económico.
- *Prod₀₂* - Satisfacer las restricciones eléctricas que garanticen la seguridad del proceso de producción.

El rol *Con* presenta los siguientes objetivos:

- *Con₀₁* - Minimizar el impacto medioambiental que el proceso de producción de energía eléctrica haya inducido sobre el entorno.
- *Con₀₂* - Minimizar el coste económico de la energía comprada.
- *Con₀₃* - Garantizar el abastecimiento eléctrico mínimo para desempeñar las funcionalidades críticas, teniendo en cuenta las restricciones eléctricas que garanticen el correcto desempeño de las funcionalidades.
- *Con₀₄* – Combinar los objetivos anteriores.

El rol *Serv: i* presenta el siguiente objetivo:

- *Serv_{oi}* - Maximizar el uso del servicio instanciado *i* que proporciona el rol *Serv* al agente que lo implementa.

Por su parte, las clases de agente definen sus objetivos por la agregación de los objetivos de cada uno de roles que implementan aunque pueden definir roles propios de mayor nivel de abstracción que permitan orquestar y/o priorizar a cada uno de los roles en función de las necesidades instantáneas.



Rol	Objetivo	Descripción
<i>Prod</i>	<i>Prod_{o1}</i>	Maximizar el producto de la energía eléctrica vendida y el coste económico
	<i>Prod_{o2}</i>	Satisfacer las restricciones eléctricas que garanticen la seguridad del proceso de producción
<i>Con</i>	<i>Con_{o1}</i>	Minimizar el impacto medioambiental del proceso de producción de energía eléctrica
	<i>Con_{o2}</i>	Minimizar el coste económico de la energía comprada
	<i>Con_{o3}</i>	Garantizar el abastecimiento eléctrico mínimo
	<i>Con_{o4}</i>	Combinar los anteriores
<i>Serv: i</i>	<i>Serv_{oi}</i>	Maximizar el uso del servicio ofrecido por la instancia <i>i</i> del rol <i>Serv</i>

Tabla 3.4. Resumen de los objetivos asociados a cada uno de los roles

La clase de agente *F* presenta el objetivo propio, F_{o1} , de maximizar la energía producida, y de los objetivos obtenidos a partir de la como la unión de los objetivos individuales de los roles que implementa, siendo: $Prod_{o1}$, $Prod_{o2}$ y Rec_{o1} . Por su parte, la clase de agente *T* presenta el objetivo propio, T_{o1} , de mantener constante, en la medida de lo posible, el balance energético entre la entrada y salida de potencia. A su vez presenta la unión de los objetivos individuales de los roles que implementa, siendo: $Prod_{o1}$, $Prod_{o2}$, Con_{o1} , Con_{o2} , Con_{o3} , y Con_{o4} . La clase de agente, *C* presenta como objetivo propio, C_{o1} , obtener la potencia eléctrica requerida. Además también hace suyos los objetivos como la unión de los objetivos individuales de los roles que implementa, siendo: Con_{o1} , Con_{o2} , Con_{o3} , y Con_{o4} . Cada una de la clases de agente *BA, IU, OG, SP, PM* presentan el objetivo propio con denominación común, $X_{o1} / X \in \{BA, IU, OG, SP, PM\}$, de llevar a cabo los



diversos servicios ofrecidos. Además, incorpora los objetivos individuales de cada una de las i instancias de los roles implementados $Serv_{oi}$ para cada uno de los i servicios que proporciona el agente.

Agente	Rol	Objetivo	Descripción
F		F_{o1}	Maximizar la energía producida
	$Prod$	$Prod_{o1}$	
		$Prod_{o2}$	

Tabla 3.5. Resumen de los objetivos de la clase de agente F

El resumen de los objetivos de cada una de las clases de agentes se puede observar en: tabla 3.5, tabla 3.6, tabla 3.7 y tabla 3.8.

Agente	Rol	Objetivo	Descripción
T		T_{o1}	Mantener constante el balance energético entre la entrada y salida de potencia
	$Prod$	$Prod_{o1}$	
		$Prod_{o2}$	
	Con	Con_{o1}	
		Con_{o2}	
		Con_{o3}	
		Con_{o4}	

Tabla 3.6. Resumen de los objetivos de la clase de agente T



Agente	Rol	Objetivo	Descripción
C		C_{o1}	Obtener la potencia eléctrica requerida
	Con	Con_{o1}	
		Con_{o2}	
		Con_{o3}	
		Con_{o4}	

Tabla 3.7. Resumen de los objetivos de la clase de agente C

Agente	Rol	Objetivo	Descripción
$X \in S$		X_{o1}	Llevar a cabo los servicios ofrecidos
	$Serv: i$	$Serv_{oi}$	

Tabla 3.8. Resumen de los objetivos de la clase de agentes $BA, IU, OG, SP, Og, PM..$

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



3. Modelo estructural

El modelo estructural aúna la información obtenida en cada una de las tareas que componen la fase de diseño con el fin de determinar ¿cómo es la estructura que va a dar soporte al modelo funcional? Se trata de definir la organización a dos niveles: a nivel interno, definiendo la estructura interna de cada agente; y a nivel externo, identificando las relaciones de interacción entre cada una de las clases de agentes. La fase de diseño está compuesta por cuatro tareas. En primer lugar, es conveniente realizar la tarea “Elección del tipo de agente” para definir los modelos de agente que darán soporte a cada una de las clases de agentes definidas en la ecuación 3.15. Seguidamente, mediante la tarea “Elección de atributos y métodos” se dan valores concretos a los parámetros definidos en el modelo de agente. Llegados a este punto la estructura interna de las clases de agentes queda definida, por lo que el siguiente paso es definir la estructura externa. Para ello, la tarea “Elección de relaciones” está orientada a identificar los tipos de relaciones de cooperación y competición entre cada par de clases de agentes. Por último, la tarea “Definición de protocolos de interacción” permite definir el intercambio de mensajes entre cada par de clases de agentes.

3.1. Modelo de agente

Existen diversos modelos de agentes y de sistemas multiagente, que presentan diversas características y/o comportamientos por lo que el tipo de soluciones que ofrecen depende en gran medida del modelo elegido. Los distintos modelos de agentes permiten determinar el tipo de solución que entra a formar parte del modelo estructural y que da soporte a cada una de las clases de agentes definidas en el modelo funcional. Es por ello, que de acuerdo a los requerimientos y naturaleza de cada clase de agente, es conveniente elegir el modelo de agente más acorde para su implementación. A continuación, se analizan los distintos modelos de sistemas multiagente detallando las características, ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. (Georgeff et al., 1999) identifica tres familias de modelos de agentes: Modelos de razonamiento práctico –BDI-; Modelos BDI centrados en la propuesta original de (Bratman, 1987); y modelos de razonamiento procedimental que se centran en entornos dinámicos – agentes reactivos y cognitivos-. Mediante un proceso de abstracción se pueden establecer dos



grandes familias: agentes ubicados y BDI que engloban a los reactivos y cognitivos. Finalmente, se propone el modelo sistema multiagente que será utilizado.

3.1.1. Modelo de agente ubicado

La ubicación es una propiedad fundamental y ampliamente aceptada de los agentes, de hecho (Wooldridge and Jennings, 1995) define agente como “ un sistema de computación que está ubicado en un entorno y que es capaz de realizar acciones autónomamente en este entorno con el fin de alcanzar sus objetivos”. (Weyns and Holvoet, 2004) aclaran que la propiedad ubicación hace referencia a que el agente no está aislado, sino que existe en un entorno, por lo que potencia las relaciones locales entre agentes y los objetos que habitan en el entorno. Orienta el modelo hacia las interacciones entre los agentes y los resultados que producen en el entorno. En contraposición está el modelo BDI, ya que el foco de atención se centra en la manipulación de la representación simbólica del entorno y del comportamiento deseado para determinar la toma de decisiones.

Los principales características de los agente ubicados son identificadas por (Weyns and Holvoet, 2004) de forma que “viven y actúan en el presente”, ya que no utilizan razonamientos a largo plazo para decidir las acciones que van a realizar; “La toma de decisiones se realiza en base a su propio estado y a las percepciones del entorno en el que están ubicados; “Utilizan el entorno como fuente de información”.

Ferber-Müller

El trabajo realizado por (Genesereth and Nilsson, 1987) establece las bases de los modelos de agentes reactivos y cognitivos -dotados de memoria-. Por su parte, (Ferber and Müller, 1996) desarrolla un modelo siguiendo la línea anterior que se caracteriza por separar lo que el agente realiza de lo que realmente sucede. El agente produce influencias en el entorno y dicho entorno reacciona combinando dichas influencias hasta alcanzar un nuevo estado. (Weyns and Holvoet, 2004) realiza un análisis del modelo Ferber-Müller donde establece las principales características diferenciadoras, ventajas e inconvenientes. Está basado en tres principios. El primero de ellos supone la distinción entre influencias y reacciones, ya que los agentes producen influencias que tratan de modificar el



estado del entorno a partir de las reacciones que son producidas por el entorno al combinar dichas influencias con el estado actual del entorno y las leyes que lo gobiernan. El segundo, establece la dinámica del sistema en dos partes: la dinámica del entorno y la dinámica de los agentes ubicados en dicho entorno. El tercero, el modelo establece la dinámica del sistema multiagente por medio de máquinas de estado abstractas. Entre las ventajas, cabe destacar que: permite interacciones complejas entre agentes y el entorno, siendo aplicable a agentes reactivos y cognitivos aunque presenta dos principales inconvenientes. El primero, es que los agentes deben realizar la percepción y las acciones simultáneamente en cada ciclo, por lo que requiere que los agentes estén sincronizados globalmente, lo que repercute en el uso de un elemento de control centralizado que va en contra de la propia naturaleza distribuida de los sistemas multiagente. El segundo inconveniente está relacionado con la escalabilidad, ya que la combinación de influencias para determinar las reacciones dependen exponencialmente del número de agentes del sistema, presentando una complejidad de $O(n^2)$, siendo n el número de agentes.

Maciá

Siguiendo la línea marcada por los modelos de Genesereth-Nilsson y Ferber-Müller se encuentra el trabajo realizado por (Maciá, 2001). Dicho trabajo establece el marco formal y modelo para agentes reactivos y cognitivos de forma que son aplicados a un sistema de regeneración de nodos concebido bajo el paradigma de agentes. A su vez, dicho modelo ha sido utilizado para modelar sistemas biológicos en los trabajos (Soriano, 2001) y (Ruiz, 2003). El modelo es suficientemente genérico y potente para ofrecer soluciones en dominios de problemas tan diversos como son las redes de computadores y los sistemas biológicos, sin embargo comparte las ventajas e inconvenientes que subyacen al modelo Ferber-Müller.

Weyns-Holvoet

El modelo de entorno, de agente y de sistema multiagente propuesto en (Weyns and Holvoet, 2004) parte de la base del modelo Ferber-Müller buscando evitar los problemas de escalabilidad y de reducir las necesidades de sincronización global de los agentes. Para ello, introduce el concepto de sincronización regional.

La sincronización regional evita que sea el entorno quien sincronice a todos los agentes dejando esta tarea a los propios agentes. Se evita la necesidad de un



gran elemento de sincronización global dotando a cada agente con su propio sincronizador local. Cada sincronizador se encarga de sincronizarse con sus respectivos agentes asociados. El objetivo de la sincronización local es permitir que un subconjunto de agentes relacionados realice acciones simultáneas sobre el entorno. Los autores denominan “región” al subconjunto de agentes sincronizados, de forma que el sistema multiagente queda compuesto por regiones no solapadas. Los agentes al estar ubicados pueden no ser visibles al resto de los miembros de su región, por lo que se pueden sincronizar directamente con algunos de los miembros de la región e indirectamente con todos. El marco teórico que da cuerpo al modelo de sistema multiagente se encuentra detallado en el anexo B.

El modelo supera los problemas de escalabilidad y sincronización global mediante el uso de la sincronización regional, detallando las actividades que se van ejecutando en el entorno –independientemente de las actividades de los agentes- y su interacción con los agentes y el propio entorno. Las definiciones de agente y sistema multiagente están descritas con tuplas que contienen 12 y 20 elementos respectivamente. El número de elementos contrasta con el número de elementos utilizados tanto en el modelo Ferber-Müller como en el de Maciá que se desarrollan con un marco teórico más reducido.

Agentes y Artefactos

El modelo A&A (Ricci et al., 2010) aunque sigue la línea marcada por los anteriores modelos, introduce el concepto de “artefacto”, acuñado por (Omicini et al., 2008), como medio de abstracción del entorno en el que se ubican los agentes. Comparte ciertos puntos de vista con el modelo Weyns-Holvoet como el de considerar al entorno como un elemento de abstracción de primer nivel, aunque ofrece un modelo orientado a la programación de sistemas multiagente. Define el sistema multiagente A&A como “un sistema computacional compuesto por agentes y artefactos”. Asimismo, define agente A&A como “una entidad computacional autónoma y proactiva que encapsula su propio control y que se encarga de alcanzar los objetivos que determinan el comportamiento global del sistema multiagente. Por su parte, los artefactos son entidades pasivas y reactivas que proporcionan servicios que son utilizados por los agentes y utilizan el entorno de acuerdo a las necesidades de los agentes. Los agentes y los artefactos se pueden organizar en “espacios de trabajo” a modo de contenedores para definir la topología del entorno.



3.1.2. Modelo de agente BDI

El paradigma BDI, introducido en el capítulo de metodologías de modelado, establece un modelo de agentes basados en los conceptos teóricos y filosóficos: creencias, deseos e intenciones, establecidos en (Bratman, 1987). Dichos conceptos han sido formalizados por (Cohen and Levesque, 1990) definiendo las intenciones de un agente como la secuencia temporal de sus creencias y deseos -objetivos-, de forma que el agente mantendrá sus objetivos hasta que crea que los ha alcanzado o que son inalcanzables. Los tres conceptos se encuentran relacionados, de forma que las creencias se corresponden con las percepciones que el agente tiene del entorno. Las intenciones son el conjunto de planes, o acciones que el agente es capaz de realizar. Los deseos son los que determinan el comportamiento del agente, ya que la elección de las intenciones a ejecutar se hace en función de los objetivos a satisfacer.

(Rao and Georgeff, 1991) establece un modelo del entorno, llamado "árbol temporal" utilizando una estructura de árbol que representa el tiempo, donde se representa el pasado, presente y futuro. Define "situación" como un punto particular de dicho árbol temporal, de forma que los distintos eventos -acciones- pueden cambiar de una situación a otra. Distingue dos tipos de eventos: "eventos primitivos" inducidos por los agentes y que permiten la transición de una situación a otra; y "eventos no primitivos", que permiten transiciones entre situaciones no adyacentes, por lo que permite modelar parcialmente planes. A través de eventos primitivos se puede establecer un modelo jerárquico de planes. Las ramas del árbol representan las distintas alternativas de las elecciones que tiene el agente para ejecutar en cada instante. Cada nodo del árbol representa las creencias del agente en ese instante. Utiliza el concepto de "gran realismo" para indicar que los agentes han de ser capaces de alcanzar los objetivos mediante la elección correcta de los eventos a ejecutar. Esto se consigue, definiendo las posibles creencias a partir del árbol temporal donde el nodo inicial contiene las creencias en dicho instante del agente, las ramas representan las posibles acciones, eventos o intenciones a ejecutar y cada nodo al final de cada rama indica las creencias o estado del mundo después de haber ejecutado dichos eventos. Una vez definidas las posibles creencias, se definen los objetivos como el subconjunto de ramas del árbol de creencias. A su vez, las intenciones son un subconjunto de las ramas definidas en el subconjunto de posibles objetivos. Este proceso ilustra la definición de un árbol que representa el estado inicial y las creencias del agente, las posibles



acciones y los resultados obtenidos. A partir de ahí, se van realizando podas para determinar sucesivamente los objetivos y los planes a ejecutar. De esta forma se garantiza que para cada situación, existen unos objetivos que se pueden alcanzar ejecutando los eventos.

El planteamiento del modelo de agente BDI prioriza el razonamiento interno del agente frente a las interacciones con otros, para la elaboración de planes a largo plazo que requieren cierta capacidad de cómputo. En función del número de planes que un agente sea capaz de ejecutar en un instante determinado, supone crear un árbol de gran tamaño en el que la elección de una rama u otra puede ser trivial o extremadamente compleja dependiendo del ámbito del problema a tratar. Pensando por ejemplo en el ámbito del ajedrez, donde un agente represente a cada jugador, la elección de la pieza a mover y hacia donde moverla, no es trivial debido al alto número de piezas, los posibles destinos y la idoneidad de cada movimiento en previsión del futuro movimiento del adversario. Es por ello, que este planteamiento resta importancia a las interacciones entre agentes por lo que no es adecuado para la resolución de problemas a partir del comportamiento emergente del sistema multiagente.

3.1.3. Propuesta de modelo de agente

La principal diferencia entre los modelos de agentes ubicados y BDI, reside en que el primero prioriza las interacciones entre los agentes estableciendo el entorno como un nivel de abstracción de primer nivel y el segundo está orientado a un razonamiento interno basado en una planificación compleja a largo plazo. La propuesta, aunque está basada en la línea de los modelos ubicados, incorpora algunos conceptos de los BDI con el fin de establecer mecanismos de razonamiento ligeros basados en objetivos. Los distintos modelos de sistemas multiagente ubicados permiten establecer estructuras de agentes lineales donde la organización es sencilla permitiendo la comunicación entre cualquier par de agentes. Esto puede ocasionar problemas de sincronización, y por lo tanto de rendimiento, en sistemas con un alto número de agentes. Para solucionar dicho inconveniente, el modelo Weyns-Holvoet introduce el concepto de región, por lo que permite crear regiones o subconjuntos de agentes que interactúan entre ellos, permitiendo la comunicación en cada región y aislando del resto de regiones. Aunque este enfoque soluciona dicho problema, la propuesta puede no llegar a



ser suficientemente potente en algunos escenarios ya que no permite establecer organizaciones de agentes de mayor complejidad, por ejemplo jerarquizadas.

El modelo propuesto define a los agentes mediante la agregación de roles y/o agentes que permiten establecer estructuras complejas llegando incluso a organizaciones jerárquicas de agentes, de forma que las interacciones se circunscriban entre los agentes gobernados por el mismo agente padre. El modelo persigue el objetivo de potenciar la reusabilidad y modularidad de las implementaciones en base a establecer roles y agentes que puedan ser reutilizados. Esta definición de agente es suficientemente potente como para dar cobertura a sistemas complejos, ya que al definir niveles de abstracción, un único agente en el nivel principal puede albergar al sistema multiagente completo en niveles inferiores. La utilización de objetivos propios a cada uno de los roles y/o agentes, no pretende alcanzar el nivel de planificación a largo plazo de los modelos BDI, pero establece mecanismos de razonamiento ligeros subordinados a las interacciones entre los agentes. La subordinación prioriza la interacción entre agentes a la hora de resolver el problema utilizando el razonamiento interno para determinar las acciones a realizar durante los protocolos de negociación entre agentes. Las principales ventajas del modelo propuesto se recogen en la tabla 3.9.

Ventajas

Estructuras de agentes complejas compuestas y jerarquizadas
Agregación de agentes
Agregación de roles
Razonamiento ligero subordinado a interacciones entre agentes
Cercana al desarrollo

Tabla 3.9. Resumen de las ventajas del modelo propuesto

A continuación, se define el entorno, haciendo especial hincapié en el comportamiento o naturaleza a partir de la evolución del estado dinámico. Seguidamente se pasa a definir el modelo de agente ubicado en el entorno, y por tanto el sistema multiagente. Se utiliza la notación definida por (Ferber and Müller,



1996), complementada por (Maciá, 2001), (Weyns and Holvoet, 2004); adicionalmente se utilizan conceptos propios de (Rao and Georgeff, 1991) y algunos referentes a la implementación, empleados por (Ricci et al., 2010).

Entorno

La definición de entorno utilizada en el modelo de Weyns-Holvoet añade el concepto de consumición a los conceptos de acciones, influencias y reacciones utilizados en los modelos de Ferber-Müller y Maciá. Las consumiciones, que tratan de representar el efecto que las reacciones del entorno producen sobre los agentes, proporcionan un mayor nivel de refinamiento de los modelos anteriores a costa de hacer más complejo el ciclo de relación entre los agentes y el entorno. El agente percibe el entorno, realiza acciones que se traducen en influencias sobre el entorno, dichas influencias producen reacciones en el entorno que a su vez generan consumiciones que pueden ser consumidas por los agentes, iniciándose un nuevo ciclo. Las consumiciones permiten diferenciar entre las percepciones que el agente realiza de forma activa y las consumiciones que se producen de forma pasiva. Esta sutil diferencia no es determinante para el propósito de nuestro modelo, por lo que para primar la comprensión y utilización de la evolución del estado dinámico del entorno se utiliza la definición de entorno empleada en (Ferber and Müller, 1996) y (Maciá, 2001) añadiendo el concepto de región aplicado al entorno en vez que a los agentes tal y como realiza (Weyns and Holvoet, 2004).

De acuerdo con (Maciá, 2001), el entorno se concibe como una entidad de primer nivel donde los agentes están ubicados y que pueden interactuar con él mediante acciones a través de la estructura que aparece en las definiciones 3.22. El entorno, E , se descompone en un conjunto finito de regiones disjuntas. La concepción del entorno bajo distintas regiones o demarcaciones permite que se actualice el estado de cada una de forma independiente, así se evita la necesidad de sincronizar las acciones, influencias y reacciones de forma global. La estructura está formada por una tupla formada de 7 elementos.

El primero de ellos, Δ , representa el conjunto finito de regiones, δ_i , que conforman el entorno. Σ representa el conjunto finito de los conjuntos de posibles estados, Σ^{δ_i} , de cada una de las regiones δ_i del entorno. A su vez, Σ^{δ_i} , está compuesto por los posibles estados $\sigma_j^{\delta_i}$ de cada una de las regiones. Cada uno de los estados, $\sigma_j^{\delta_i}$, se define conforme a la definición utilizada por (Maciá, 2001).



$$E = \langle \Delta, \Sigma, \Gamma, P, \Lambda, Exec, React \rangle$$

$$\Delta = \{\delta_1, \dots, \delta_n\}$$

$$\Sigma = \{\Sigma^{\delta_1}, \dots, \Sigma^{\delta_n}\} \quad \Sigma^{\delta_i} = \{\sigma_1^{\delta_i}, \dots, \sigma_m^{\delta_i}\}$$

$$\Gamma = \{\Gamma^{\delta_1}, \dots, \Gamma^{\delta_n}\} \quad \Gamma^{\delta_i} = \{\gamma_1^{\delta_i}, \dots, \gamma_s^{\delta_i}\}$$

$$P = \{P^{\delta_1}, \dots, P^{\delta_n}\} \quad P^{\delta_i} = \{p_1^{\delta_i}, \dots, p_q^{\delta_i}\}$$

$$\Lambda = \{\Lambda^{\delta_1}, \dots, \Lambda^{\delta_n}\} \quad \Lambda^{\delta_i} = \{\lambda_1^{\delta_i}, \dots, \lambda_r^{\delta_i}\}$$

$$Exec: P \times \Sigma \rightarrow \Gamma \quad Exec_{\delta_i}: P^{\delta_i} \times \Sigma^{\delta_i} \rightarrow \Gamma^{\delta_i}$$

$$React: \Sigma \times \Gamma \times \Lambda \rightarrow \Sigma \quad React_{\delta_i}: \Sigma^{\delta_i} \times \Gamma^{\delta_i} \times \Lambda^{\delta_i} \rightarrow \Sigma^{\delta_i}$$

3.22

P es el conjunto finito que alberga a todos los posibles conjuntos de tareas, acciones u operaciones, P^{δ_i} , que se pueden realizar en cada región δ_i . Por su parte, P^{δ_i} contiene el conjunto finito de tareas, acciones u operaciones que se pueden realizar en dicha región, siendo $p_j^{\delta_i}$ cada una de las tareas a ejecutar y definiendo $\wp(P^{\delta_i}) \subseteq P^{\delta_i}$ como un plan compuesto por una o varias tareas a aplicar sobre la región δ_i .

Γ describe el conjunto finito de los conjuntos de posibles influencias o intentos de acción, Γ^{δ_i} , de cada una región, δ_i . A su vez, Γ^{δ_i} está formado por el conjunto finito de posibles influencias, $\gamma_j^{\delta_i}$, sobre dicha región.

Λ es introducido por (Ferber and Müller, 1996) y representa el conjunto finito de leyes que gobiernan el entorno. De forma análoga a los conjuntos anteriores, se puede descomponer en el conjunto finito de las leyes, Λ^{δ_i} que gobiernan a cada una de las regiones, δ_i , que componen el entorno, E . Por lo que, Λ^{δ_i} está compuesto por el conjunto finito de leyes, $\lambda_j^{\delta_i}$, que gobiernan la región δ_i .

La función *Exec* modela la aplicación de un plan o conjunto de acciones, p_i , sobre el entorno que se encuentra en un estado concreto, σ_i , produciendo una serie de influencias, γ_i , sobre el entorno. Dicha función se puede particularizar para cada una de las regiones δ_i , tomando el nombre de $Exec_{\delta_i}$. La utilización de influencias permite combinar las acciones de las diversas entidades que realizan tareas o planes sobre el entorno. Por su parte, la función *React* modela la transición



del estado actual del entorno, σ_i , al siguiente estado, σ_j , como reacción a las influencias recibidas γ_i y el conjunto de leyes, λ , que determinan las reacciones del entorno E . De forma análoga a la función anterior, se puede particularizar para cada región δ_i , tomando el nombre de $React_{\delta_i}$. Ver definiciones 3.22 y 3.23.

$$\begin{aligned} \gamma_z^{\delta_i} &= Exec_{\delta_i}(p_j^{\delta_i}, \sigma_j^{\delta_i}) : \gamma_z^{\delta_i} \in \Gamma^{\delta_i} \wedge p_j^{\delta_i} \in P^{\delta_i} \wedge \sigma_j^{\delta_i} \in \Sigma^{\delta_i} \\ \sigma_z^{\delta_i} &= React_{\delta_i}(\sigma_j^{\delta_i}, \gamma_j^{\delta_i}, \lambda^{\delta_i}) : \gamma_j^{\delta_i} \in \Gamma^{\delta_i} \wedge \sigma_j^{\delta_i}, \sigma_z^{\delta_i} \in \Sigma^{\delta_i} \wedge \lambda^{\delta_i} \\ &\subseteq \Lambda^{\delta_i} \end{aligned} \quad 3.23$$

La evolución del estado dinámico del entorno está determinada por la función $Evol$ que puede considerarse como un bucle infinito donde en cada iteración t se obtiene el estado, $t + 1$ de la siguiente iteración. Es el resultado de la composición de las funciones $Exec$ y $React$. Ver definiciones 3.24.

$$\begin{aligned} Evol: \Sigma \times P \times \Lambda &\rightarrow \Sigma & Evol_{\delta_i}: \Sigma^{\delta_i} \times P^{\delta_i} \times \Lambda^{\delta_i} &\rightarrow \Sigma^{\delta_i} \\ \sigma_{t+1}^{\delta_i} &= Evol_{\delta_i}(\sigma_t^{\delta_i}, \wp(p^{\delta_i}), \lambda^{\delta_i}) = \\ &= React_{\delta_i}\left(\sigma_t^{\delta_i}, \bigcup_{i=1}^{card(\wp(p^{\delta_i}))} Exec_{\delta_i}(\wp(p^{\delta_i})_i, \sigma_t^{\delta_i}), \lambda^{\delta_i}\right) \\ \wp(p^{\delta_i})_i &\subseteq P^{\delta_i} \wedge \sigma_t^{\delta_i}, \sigma_{t+1}^{\delta_i} \in \Sigma^{\delta_i} \wedge \lambda^{\delta_i} \subseteq \Lambda^{\delta_i} \end{aligned} \quad 3.24$$

Sistema multiagente

El sistema multiagente, MAS , se puede considerar como una dupla formada por el entorno, E , y por el conjunto finito de agentes, A , siendo α_i cada uno de los agentes capaces de ejecutar operaciones sobre dicho entorno. De acuerdo al marco teórico utilizado para definir el entorno y su estado dinámico, el MAS queda formalizado en 3.25.

$$\begin{aligned} MAS = \langle A, E \rangle &= \langle A, \Delta, \Sigma, \Gamma, P, \Lambda, Exec, React \rangle \\ A &= \{\alpha_1, \dots, \alpha_e\} \end{aligned} \quad 3.25$$



Agente

La definición de agente parte de los modelos de agente cognitivo y reflejo (Maciá, 2001), y de agente ubicado (Weyns and Holvoet, 2004). A los conceptos utilizados en dichas definiciones se han eliminado conceptos del modelo de agente ubicado y se han añadido otros con el fin de permitir la composición mediante agentes y roles, razonamiento ligero basado en objetivos, cercanía al proceso de desarrollo del sistema multiagente.

El tipo de agente, α_i , se define mediante la tupla que se muestra en 3.26 y que está compuesta por elementos que se pueden clasificar en dos grupos. Los comunes, y que por tanto suelen aparecer en los modelos derivados de (Ferber and Müller, 1996) que han sido adaptados y los denominados añadidos con el fin de alcanzar los objetivos esbozados previamente.

Los elementos comunes, que suelen caracterizar a los agentes, han sido adaptados para que hagan referencia a la región δ_{α_i} sobre la que el agente, α_i , se encuentra ubicado, presentando la restricción de que el agente en un instante determinado de tiempo únicamente puede pertenecer a una región particular, aunque a partir de la dinámica del sistema el agente puede cambiar de una región a otra. El primero de los elementos comunes es Φ^{α_i} , que representa el conjunto finito de posibles conjuntos de percepciones que el agente puede tener de dicha región, siendo $\phi_j^{\alpha_i}$ cada uno de los conjuntos de percepciones del agente sobre la región en la que se encuentra ubicado. S^{α_i} contiene el conjunto finito de posibles estados que puede estar el agente, siendo $S^{\alpha_i*} \subseteq S^{\alpha_i}$ el conjunto finito de los estados objetivos o deseados y que por lo tanto el agente persigue. Por su parte, P^{α_i} , está compuesto por el conjunto de posibles operaciones, acciones o planes que puede realizar el agente sobre la región que ocupa, siendo estos un subconjunto de las posibles acciones que dicha región permite realizar, $P^{\alpha_i} \subseteq P^{\delta_{\alpha_i}}$. La definición de los elementos que componen cada uno de estos conjuntos es análoga a la utilizada en (Maciá, 2001).

Respecto a los elementos añadidos, R^{α_i} , hace referencia al conjunto finito de roles, $r_i^{\alpha_i}$ que el agente implementa, permitiendo obtener el comportamiento del agente mediante la composición de los roles asociados. Por otro lado, $\alpha^{\alpha_i} \in A$ representa el agente de un nivel de abstracción mayor que contiene al agente, α_i , es decir el agente padre de α_i . Por su parte, $\theta^{\alpha_i} \in A$ es el conjunto finito de agentes subordinados a α_i , siguiendo con las relaciones de parentesco, son los agentes hijos de α_i , siendo $\theta_j^{\alpha_i}$ cada uno de los agentes hijos. $\gamma^{\alpha_i} \in A$ representa el conjunto



finito de agentes vecinos que se encuentran en el mismo nivel de abstracción de α_i , y que son capaces de interactuar con él. La figura 3.4 muestra desde el punto de vista del agente α_i los elementos que representan a cada uno de los agentes que poseen algún tipo de relación de parentesco con él.

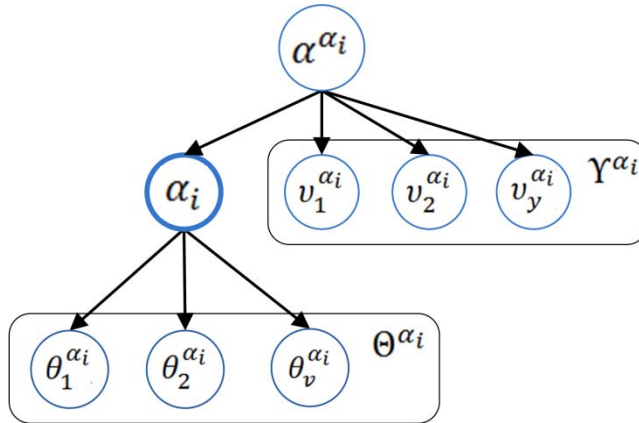


Figura 3.4. Vista de las relaciones de parentesco del agente α_i y los agentes que pertenecen a distintos niveles de abstracción

La naturaleza del agente basada en la composición tanto de agentes como de roles se ve reflejada en el diagrama entidad relación (Chen, 1976) de la figura 3.5. Refleja que el agente α_i puede gobernar a un subconjunto de agentes, y su comportamiento está determinado por el conjunto de roles R^{α_i} . Además cada uno de los roles, $r_j^{\alpha_i}$ puede estar a su vez compuesto por otro subconjunto de roles. La organización de agentes basada en la composición recursiva permite crear organizaciones complejas, siendo posible establecer niveles de abstracción donde un subconjunto de agentes queda encapsulado bajo un agente de un nivel de abstracción superior.

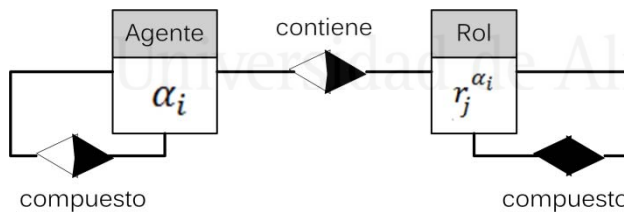


Figura 3.5. Diagrama entidad relación que muestra las relaciones de composición entre agentes y roles



$$\alpha_i = \langle \alpha^{\alpha_i}, \theta^{\alpha_i}, R^{\alpha_i}, Y^{\alpha_i}, \Phi^{\alpha_i}, S^{\alpha_i}, S^{\alpha_i*}, P^{\alpha_i}, \text{Locate}^{\alpha_i}, \text{Percept}^{\alpha_i}, \text{ComposeR}^{\alpha_i}, \text{Compose}\theta^{\alpha_i}, \text{Decide}^{\alpha_i} \rangle$$

$$\alpha_i, \alpha^{\alpha_i}, \theta^{\alpha_i}, Y^{\alpha_i} \in A$$

$$\theta^{\alpha_i} = \{\theta_1^{\alpha_i}, \dots, \theta_v^{\alpha_i}\}$$

$$R^{\alpha_i} = \{r_1^{\alpha_i}, \dots, r_u^{\alpha_i}\}$$

$$Y^{\alpha_i} = \{v_1^{\alpha_i}, \dots, v_y^{\alpha_i}\}$$

3.26

$$\Phi^{\alpha_i} = \{\phi_1^{\alpha_i}, \dots, \phi_w^{\alpha_i}\}$$

$$S^{\alpha_i} = \{s_1^{\alpha_i}, \dots, s_z^{\alpha_i}\}$$

$$S^{\alpha_i*} = \{s_1^{\alpha_i*}, \dots, s_d^{\alpha_i*}\} / S^{\alpha_i*} \subseteq S^{\alpha_i}$$

$$P^{\alpha_i} = \{p_1^{\alpha_i}, \dots, p_d^{\alpha_i}\} / P^{\alpha_i} \subseteq P^{\delta_j} \subseteq P$$

La aplicación Locate^{α_i} permite determinar la región particular, δ_{α_i} en la que se encuentra el agente α_i , pudiendo cambiar a lo largo del tiempo. Tal y como muestra la definición 3.27.

$$\text{Locate}^{\alpha_i}: A \rightarrow \Delta$$

3.27

$$\delta_{\alpha_i} = \text{Locate}^{\alpha_i}(\alpha_i) / \delta_{\alpha_i} \in \Delta \wedge \alpha_i \in A$$

La aplicación $\text{Percept}^{\alpha_i}$, conforme muestra la definición 3.28, se encarga de determinar el conjunto de percepciones que el agente α_i es capaz de obtener a partir del estado $\Sigma^{\delta_{\alpha_i}}$ de la región δ_{α_i} en la que se encuentra ubicado.

$$\text{Percept}^{\alpha_i}: \Sigma^{\delta_{\alpha_i}} \rightarrow \Phi^{\alpha_i}$$

3.28

$$\phi_j^{\alpha_i} = \text{Percept}^{\alpha_i}(\sigma_j^{\delta_{\alpha_i}}) / \phi_j^{\alpha_i} \in \Phi^{\alpha_i} \wedge \sigma_j^{\delta_{\alpha_i}} \in \Sigma^{\delta_{\alpha_i}}$$

La aplicación $\text{ComposeR}^{\alpha_i}$ se encarga de componer las operaciones que quieren ejecutar cada uno de los roles $r_j^{\alpha_i}$ que implementa el agente α_i a partir del conjunto de percepciones ϕ^{α_i} y del conjunto de agentes vecinos Y^{α_i} , obteniendo



como resultado el plan de operaciones compuesto, $p\theta^{\alpha_i}$, que el agente α_i es capaz de ejecutar a partir de los operaciones propuestas por cada rol. El conjunto de operaciones, que cada rol $r_j^{\alpha_i} \in R^{\alpha_i}$, es capaz de ejecutar, $p^{r_j^{\alpha_i}}$, es un subconjunto del conjunto de operaciones que el agente es capaz de realizar, P^{α_i} . Además, se define $P^{R^{\alpha_i}}$ como el conjunto de operaciones que los roles implementados por el agente, α_i , son capaces de efectuar como la unión de las operaciones de cada rol individual $p^{r_j^{\alpha_i}}$. Ver definiciones 3.29. La aplicación es de naturaleza recursiva debido a la concepción de rol, consultar definición 3.32, ya que un rol puede estar compuesto por un conjunto de roles y así sucesivamente.

$$\text{Compose}R^{\alpha_i}: (R^{\alpha_i} \times \dots \times R^{\alpha_i}) \times \Phi^{\alpha_i} \times \Upsilon^{\alpha_i} \rightarrow P^{R^{\alpha_i}}$$

$$pR^{\alpha_i} = \text{Compose}R^{\alpha_i} \left((r_1^{\alpha_i}, \dots, r_u^{\alpha_i}), \phi_j^{\alpha_i}, \Upsilon^{\alpha_i} \right) /$$

$$r_j^{\alpha_i} \in R^{\alpha_i} \wedge pR^{\alpha_i} \in P^{R^{\alpha_i}} \quad 3.29$$

$$P^{R^{\alpha_i}} = \bigcup_{j=1}^s p^{r_j^{\alpha_i}}$$

$$p^{r_j^{\alpha_i}} \subseteq P^{R^{\alpha_i}} \subseteq P^{\alpha_i}$$

La aplicación $\text{Compose}\theta^{\alpha_i}$ se encarga de obtener las operaciones a realizar por parte de cada uno de los agentes $\theta_j^{\alpha_i}$ subordinados a α_i . Para ello, toma como base el conjunto de percepciones $\phi_j^{\alpha_i}$ y obtiene como resultado el plan de operaciones a aplicar, $p\theta^{\alpha_i}$, del sistema multiagente subordinado a α_i , que es un subconjunto del conjunto de operaciones que el agente es capaz de realizar, P^{α_i} . Ver definiciones 3.30.

$$\text{Compose}\theta^{\alpha_i}: (\theta^{\alpha_i} \times \dots \times \theta^{\alpha_i}) \times \Phi^{\alpha_i} \rightarrow P^{\alpha_i}$$

$$p\theta^{\alpha_i} = \text{Compose}\theta^{\alpha_i} \left((\theta_1^{\alpha_i}, \dots, \theta_v^{\alpha_i}), \phi_j^{\alpha_i} \right) / \quad 3.30$$

$$\theta_j^{\alpha_i} \in \theta^{\alpha_i} \wedge p\theta^{\alpha_i} \subseteq P^{\alpha_i}$$

La aplicación Decide^{α_i} tiene el cometido de obtener el nuevo estado del agente, $s_j^{\alpha_i} \in S^{\alpha_i}$, y determinar el plan de operaciones, p^{α_i} , que el agente α_i debe ejecutar para intentar alcanzar alguno de los estados objetivos $s_j^{\alpha_i} \in S^{\alpha_i*}$. La toma de decisiones se realiza en base a las percepciones $\phi_j^{\alpha_i} \in \Phi^{\alpha_i}$, el estado actual,

$s_j^{\alpha_i} \in S^{\alpha_i}$, los estados objetivo a alcanzar S^{α_i*} , la composición de las operaciones propuestas por cada uno de los roles $pR^{\alpha_i} \in P^{\alpha_i}$, y de las operaciones solicitadas por el conjunto de agentes subordinados, $p\theta^{\alpha_i} \in P^{\alpha_i}$. Ver definiciones 3.31.

$$Decide^{\alpha_i}: \Phi^{\alpha_i} \times P^{R^{\alpha_i}} \times P^{\alpha_i} \times S^{\alpha_i} \times S^{\alpha_i*} \rightarrow S^{\alpha_i} \times P^{\alpha_i}$$

$$\begin{aligned} \langle s_j^{\alpha_i}, p^{\alpha_i} \rangle = & Decide^{\alpha_i}(\phi_j^{\alpha_i}, pR^{\alpha_i}, p\theta^{\alpha_i}, s_j^{\alpha_i}, S^{\alpha_i*}) \quad / \quad 3.31 \\ \phi_j^{\alpha_i} \in & \Phi^{\alpha_i} \wedge p^{\alpha_i}, pR^{\alpha_i}, p\theta^{\alpha_i} \in P^{\alpha_i} \wedge s_j^{\alpha_i}, s_j^{\alpha_i*} \in S^{\alpha_i} \end{aligned}$$

Rol

El rol se concibe como un nivel de abstracción menor que el agente, de esta forma, el comportamiento del agente se considera que está compuesto por la agregación de roles. Esta concepción condiciona que la definición de rol sea análoga a la de agente, en la que cada uno de los roles $r_j^{\alpha_i} \in R^{\alpha_i}$ se define a través de la tupla mostrada en 3.32.

$$r_j^{\alpha_i} = \langle R^{r_j}, S^{r_j}, S^{r_j*}, P^{r_j}, Decide^{r_j} \rangle$$

$$R^{r_j} = \{r_1^{r_j}, \dots, r_h^{r_j}\}$$

$$S^{r_j} = \{s_1^{r_j}, \dots, s_f^{r_j}\}$$

$$S^{r_j*} = \{s_1^{r_j*}, \dots, s_g^{r_j*}\}$$

$$P^{r_j} = \{p_1^{r_j}, \dots, p_k^{r_j}\}$$

3.32

$$Decide^{r_j}: (R^{\alpha_i} \times \dots \times R^{\alpha_i}) \times \Phi^{\alpha_i} \times \gamma^{\alpha_i} \times S^{r_j} \times S^{r_j*} \rightarrow S^{r_j} \times P^{r_j}$$

$$\begin{aligned} \langle s_k^{r_j}, p^{r_j} \rangle = & Decide^{r_j}((r_1^{r_j}, \dots, r_h^{r_j}), \phi_k^{\alpha_i}, \gamma^{\alpha_i}, s_k^{r_j}, S^{r_j*}) \quad / \\ r_k^{r_j} \in & R^{r_j} \wedge p^{r_j} \in P^{r_j} \wedge s_k^{r_j} \in S^{r_j} \end{aligned}$$

R^{r_j} representa el conjunto finito de posibles roles que componen el rol $r_j^{\alpha_i}$. Esto permite la composición de roles mediante la definición de roles primitivos que puedan ser reutilizados. S^{r_j} contiene el conjunto finito de posibles estados que se pueden dar en el rol, asimismo S^{r_j*} hace alusión al conjunto finito de posibles estados ideales que el rol persigue. P^{r_j} representa el conjunto finito de posibles



operaciones que el rol es capaz de ejecutar, constituyendo un subconjunto del conjunto de operaciones, P^{α_i} , que el agente α_i es capaz de efectuar. Se define la aplicación $Decide^{r_j}$ con el objetivo de realizar la toma de decisiones del rol, obteniendo su nuevo posible estado $s_k^{r_j} \in S^{r_j}$ y el conjunto de operaciones o plan a ejecutar $p^{r_j} \in P^{r_j}$, para ello tiene en cuenta de forma recursiva, a cada uno de los roles $r_k^{r_j} \in R^{r_j}$ que componen el rol r_j , las percepciones Φ^{α_i} , compartidas entre todos los roles, que el agente α_i tiene sobre la región donde está ubicado, el conjunto de agentes vecinos Y^{α_i} de α_i con los que es capaz de interactuar de forma directa, el estado actual del rol $s_k^{r_j} \in S^{r_j}$, y el conjunto de posibles estados objetivos del rol S^{r_j*} .

El modelo de sistema multiagente, ubicado en distintas regiones del entorno, está basado en agentes que pueden estar compuestos por otros agentes, permitiendo la creación de estructuras jerarquizadas y organizaciones complejas de agentes válidas para aplicaciones con un gran número de agentes y de relaciones entre ellos. Asimismo, el comportamiento de cada agente se puede determinar en base a la composición del conjunto de roles que implementa.

3.2. Particularización del modelo de agente para sistemas de distribución eléctrica

El tipo o modelo de agente seleccionado, para implementar a cada uno de las clases de agentes, se ha de concretar a medida que las tareas se van realizando. En esta tarea se persigue dar valores concretos a algunos de los elementos que definen formalmente el modelo de agente propuesto. De momento, no es posible dar valores a todos los elementos de la tupla que define al agente, ya que algunos de ellos dependen del problema particular a solucionar, concretamente aquellos relacionados con la organización entre agentes y el entorno, $E, \alpha^{\alpha_i}, \theta^{\alpha_i}, Y^{\alpha_i}, \Phi^{\alpha_i}$. Por lo tanto, alcanzado este punto se procede a definir aquellos atributos que determinan el estado de cada uno de los agentes y roles, así como los estados objetivos y las operaciones que cada agente y rol es capaz de realizar para alcanzar alguno de los estados objetivos que persigue el agente.

Conforme a la definición 3.25, *SMADÉ* se puede definir como la tupla formada por el conjunto de agentes A y el entorno E , que se concretará posteriormente. El conjunto de agentes A está compuesto por agentes que pertenecen a cada una de



las clases de agentes identificadas en la sección 2.1, ver definición 3.33. El número concreto de agentes de cada tipo que finalmente compongan dicho conjunto depende del problema particular a solucionar. Por ejemplo, en el caso de querer optimizar la distribución de una instalación dotada con tres tipos de plantas suministradoras de energía y cinco viviendas que puedan ser abastecidas por dichas plantas. En etapas posteriores será cuando se concrete que hay que definir tres agentes de tipo F , cinco agentes de tipo C y asignar los valores oportunos a los atributos de cada agente.

$$SMADE = \langle A, E \rangle$$

3.33

$$A = \{\{F\}, \{T\}, \{C\}, \{BA\}, \{IU\}, \{OG\}, \{SP\}, \{PM\}\}$$

A continuación, se procede a concretar parcialmente el modelo de sistema multiagente para cada clase de agente y de los roles que los componen, mediante los atributos que conforman su estado y las operaciones que pueden efectuar. Se pretende desarrollar la composición interna del agente, dejando para las dos siguientes secciones la especificación de las relaciones de interacción entre distintos tipos de agentes.

3.2.1. Agente fuente de energía eléctrica

F

La clase de agente fuente de energía eléctrica, $F \subseteq A$, permite representar a todos los agentes que únicamente son capaces de suministrar energía eléctrica. En este caso, el conjunto de roles R^F que componen al agente F está compuesto, tal y como se identificó anteriormente, por un único rol, concretamente el rol productor $Prod$ de energía eléctrica. Antes de continuar con la definición del agente F es conveniente definir el rol $Prod$, ya que los atributos del rol serán utilizados por el agente F .

La definición del rol $Prod$ se muestra en la definición 3.34. El conjunto finito de posibles roles R^{Prod} que componen al rol $Prod$ se encuentra vacío, ya que este rol no está compuesto por ningún otro, por lo que se puede decir que es un rol primitivo.



El conjunto de posibles estados S^{Prod} está compuesto por las combinaciones de los atributos con los posibles valores que pueden tener. En este caso, para facilitar la claridad, se especifican los atributos que componen el estado del rol y el dominio de los posibles valores que se pueden dar. Se distinguen los siguientes atributos:

- *potenciaNom* hace referencia a la potencia nominal en vatios del dispositivo generador de energía eléctrica y el dominio de los posibles valores pertenece a \mathbb{C} .
- *tension* refleja la diferencia de tensión en voltios que proporciona el generador y su dominio también pertenece a \mathbb{C} .
- *potenciaDisp_t* hace alusión a la potencia disponible que es capaz de proporcionar durante el tiempo t y el dominio, análogamente a *potenciaNom* y *tension* pertenece a \mathbb{C} . Su valor se calcula a partir de la simulación de potencia SP , obteniendo la capacidad de generación mediante el servicio *simularGeneración*, que a su vez requiere los datos proporcionados por el servicio *obtenerPrevisiónMet* del agente de predicción meteorológica *PM*.
- *potenciaSal_t* hace referencia a la potencia que está suministrando durante el tiempo t , siendo su dominio \mathbb{C} . Su valor se calcula como la suma de la potencia suministrada a cada uno de los agentes vecinos que requieren potencia mediante las operaciones *solicitarCompraPotencia*, que ofrece la *potenciaDisp_t* a los agentes vecinos de tipo *Cons*, y *responderSolicitudPotencia*, que responde a la solicitud de potencia realizada por agentes vecinos *Cons*.
- *reservaMinima* representa el porcentaje de la *potenciaDisp* que se reserva con el fin de garantizar la estabilidad del sistema, el dominio está formado por los naturales del 1 al 100.
- *costeUnitProd* refleja el coste económico derivado de la obtención de un 1kwh de energía, siendo su dominio \mathbb{R} .
- *precioUnitVenta* refleja el precio al que se comercializa 1kwh de energía suministrada, siendo su dominio \mathbb{R} .
- *toxicidad* representa el impacto medioambiental que se produce durante la obtención de energía eléctrica, su dominio pertenece a los naturales comprendidos entre el 1 (bajo impacto) y el 10 (severo impacto).
- *condGestiónCarga* indica la condición a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo las políticas de gestión de carga, siendo posible elegir entre alcanzar nivel crítico, superar la media de potencia suministrada, desfavorables previsiones de obtención de energía, falta de potencia o todas.



- *políticaReducción* establece la política de solicitud de reducción de consumo. La primera política consiste en solicitar que muchos agentes reduzcan ligeramente su respectivo consumo energético. La otra política es la opuesta en la que se prefiere que un número reducido de agentes reduzcan la mayor potencia posible. También, es posible utilizar un criterio que equilibre el número de agentes que han reducido y la potencia reducida por cada uno.
- *transacciones* hace alusión al histórico de transacciones con los agentes vecinos a los que se les ha proporcionado o se les está suministrando energía eléctrica, el dominio está constituido por la tupla *Trans* que está compuesta por los agentes vecinos $cons \in Y^{\alpha_i}$, la potencia suministrada $pot \in \mathbb{C}$, el precio que han pagado por la energía suministrada $precio \in \mathbb{R}$, y la fecha/hora en que tuvo lugar la transacción $fecha \in Time$.

$$Prod = \langle R^{Prod}, S^{Prod}, S^{Prod*}, p^{Prod}, Decision^{Prod} \rangle$$

$$R^{Prod} = \emptyset$$

$$S^{Prod} = \{ potenciaNom \in \mathbb{C}, tension \in \mathbb{C}, potenciaDisp_t \in \mathbb{C}, potenciaSal_t \in \mathbb{C}, reservaMinima \in [1,100] \in \mathbb{N}, costeUnitProd \in \mathbb{R}, precioUnitVenta \in \mathbb{R}, toxicidad \in [1,10] \in \mathbb{N}, condGestiónCarga \in \mathbb{N}, políticaReducción \in \mathbb{N}, transacciones \in Trans \} \quad 3.34$$

$$Trans = \langle cons \in Y^{\alpha_i}, pot \in \mathbb{C}, precio \in \mathbb{R}, fecha \in Time \rangle$$

$$potenciaSal_t = \sum_{j=0}^n (solicitarCompraPotencia(\alpha_j, potenciaDisp_t, t)) + responderSolicitudPotencia (toxicidad, costeUnitVenta, potR) : n = card(Y^{\alpha_i})$$

$$potenciaDisp_t = S_{SP}.simularGeneracion(S_{PM}.obtenerPrevisionMet(t))$$



$$\begin{aligned}
 S^{Prod*} &= \{potenciaSal \\
 &\approx (potenciaDisp - (reservaMinima \\
 &* potenciaDisp/100)), \\
 &Max((precioUnitVenta - costeUnitProd) \\
 &* potenciaSal\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P^{Prod} &= \{solicitarCompraPotencia, \\
 &solicitarReduccionConsumo, responderSolicitudPotencia\}
 \end{aligned}$$

El conjunto de estados objetivos del rol S^{Prod*} , se obtiene a partir de los objetivos definidos en la tabla 3.4 $Prod_{o1}$ y $Prod_{o2}$. El primero de ellos consiste en conseguir que la energía suministrada sea cercana a la disponible manteniendo el porcentaje mínimo que no se comercializa para garantizar la estabilidad, formalmente $potenciaSal \approx (potenciaDisp - (reservaMinima * potenciaDisp/100))$. El segundo estado objetivo persigue maximizar el beneficio económico, lo que formalmente se refleja $Max((precioUnitVenta - costeUnitProd) * potenciaSal)$.

El conjunto de operaciones P^{Prod} está compuesto por las operaciones que el rol es capaz de solicitar o de servir y que desencadenan mecanismos de negociación colectivos. Es capaz de realizar las siguientes operaciones con los agentes que implementan el rol Con, ya sea como solicitante o como solicitado:

- *solicitarCompraPotencia* permite solicitar a los roles con si desean comprar potencia durante un periodo de tiempo determinado.
- *solicitarReducciónConsumo* permite solicitar a los agentes a los que se ha asignado previamente potencia para un periodo de tiempo, que reduzcan el consumo energético ya que es conveniente bien para evitar el agotamiento de la fuente de energía o bien para mantener la estabilidad del sistema.
- *responderSolicitudPotencia* permite responder a las solicitudes de potencia enviadas por los agentes que implementan el rol Con.

La aplicación $Decide^{Prod}$ que determina la toma de decisiones del rol *Prod* persigue los estados objetivos S^{Prod*} .

Una vez definido el rol *Prod* se procede a detallar el agente fuente de energía eléctrica, F , a partir de la definición de agente enunciada en 3.26, tal y como se muestra en la definición 3.35.

El conjunto de percepciones del agente fuente Φ^F está compuesto por la unión de los estados de los agentes vecinos $S^{v_i^F} \in Y^F$ y el estado de cada uno de los

agentes que ofrecen servicios $S^{BA}, S^{IU}, S^{OG}, S^{SP}, S^{PM}$. El conjunto de posibles estados S^F está formado por la unión de los posibles estados del rol productor S^{Prod} , el atributo id , que pertenece al dominio de los números naturales e identifica al agente de forma única dentro del sistema multiagente y por el atributo k , que también pertenece a los naturales y que se utiliza para denominar vecinos a los agentes que se encuentran a una distancia igual o menor a k . Por su parte, el conjunto de los estados objetivos S^{F*} coincide con los estados objetivos del rol productor S^{Prod*} . El conjunto de operaciones que el agente fuente P^F es capaz de realizar está compuesto por la unión de las que proporciona el rol productor P^{Prod} , con las operaciones: *solicitarBúsquedaAgente* que permite la búsqueda de otros agentes dentro del sistema multiagente; *solicitarBuscarServicio* que de forma análoga permite buscar servicios ofrecidos por cualquier agente; *solicitarServicio* que permite solicitar un servicio proporcionado por los agentes del tipo BA, IU, OG, SP, PM ; y *solicitarRegistro* que permite registrar los servicios que ofrece el agente en los agentes de búsqueda BA .

$$\begin{aligned}
 F &= \langle \alpha^F, \theta^F, R^F, \gamma^F, \phi^F, S^F, S^{F*}, P^F, \\
 &Locate^F, Percept^F, ComposeR^F, Compose\theta^F, Decide^F \rangle \\
 R^F &= \{Prod\} \\
 \phi^F &= S^{v_i^F} \cup S^{BA} \cup S^{IU} \cup S^{OG} \cup S^{SP} \cup S^{PM} \\
 S^F &= S^{Prod} \cup \{id \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{N}\} \\
 S^{F*} &= S^{Prod*} \\
 P^F &= P^{Prod} \\
 &\cup \{solicitarBúsquedaAgente, solicitarBúsquedaServicio, \\
 &solicitarServicio, solicitarRegistro\}
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$



3.2.2. Agente centro de consumo de energía eléctrica C

La clase de agente centro de consumo energía eléctrica, $C \subseteq A$, permite representar a todos los agentes que requieren energía eléctrica para realizar su cometido. En este caso, el conjunto de roles R^C que componen al agente C está compuesto, tal y como se identificó anteriormente, por un único rol, concretamente el rol consumidor Con de energía eléctrica. Antes de continuar con la definición del agente C es conveniente definir el rol Con , ya que los atributos de dicho rol serán empleados por la clase de agente C .

La definición del rol Con se muestra en la definición 3.37. Se puede observar el conjunto finito de posibles roles R^{Con} que componen al rol Con se encuentra vacío, ya que este rol no está compuesto por ningún otro, por lo que al igual que el rol $Prod$ es un rol primitivo.

El conjunto de posibles estados S^{Con} está compuesto por las combinaciones de los atributos con los posibles valores que pueden tener. De forma análoga al rol definido previamente, se especifican los atributos que componen el estado del rol y el dominio de los posibles valores que se pueden dar. Se distinguen los siguientes atributos:

- *potenciaMax* hace referencia a la potencia máxima en vatios que el dispositivo necesita para realizar su cometido. Su dominio pertenece a \mathbb{C} .
- *tensión* refleja la diferencia de tensión en voltios que requiere el dispositivo y su dominio también pertenece a \mathbb{C} .
- *criterioElecciónProd* establece el criterio de elección de proveedor de energía eléctrica. Se distinguen 4 criterios: ecológico que otorga preferencia a los productores respetuosos con el medio ambiente; económico que prioriza a los productores más económicos; satisfacción que elige en primer lugar a los proveedores de mayor capacidad para garantizar la disponibilidad; equilibrado que tiene en cuenta a los tres anteriores de forma ponderada utilizando un parámetro de ponderación para cada uno. Se define el dominio *criterio* que es una dupla formada por el identificador del criterio, *idCrit* perteneciente a los naturales comprendidos entre el 1 y 4 y por su factor de ponderación *factorPonderación* que pertenece a \mathbb{N} con valores entre 0 y 100. Los factores de ponderación son utilizados a la hora de definir los estados objetivos del rol S^{Con*} .



- *tipoSolicitud* determina estrategia a utilizar para determinar la potencia eléctrica que solicita a cada uno de los productores de energía eléctrica. Se han definido las estrategias total y proporcional. La estrategia total solicita en primer lugar toda la potencia eléctrica requerida a cada uno de los productores, en cambio la estrategia proporcional solicita a cada uno de los productores vecinos el cociente entre la potencia requerida y el número de productores.
- *modosFunc* representa los diversos modos de funcionamiento del centro de consumo. Se considera el centro de consumo como una agrupación de modos de funcionamiento o funcionalidades que presentan demandas eléctricas propias. El dominio está constituido por la tupla *Funcionalidad* que está compuesta por: *idModo* $\in \mathbb{N}$ que es un identificador del modo de funcionamiento que pertenece al dominio de los naturales; *importancia* $\in \mathbb{N}$ que es un número natural que cuantifica lo importancia de dicho modo; y por último *potReq* $\in \mathbb{C}$ que es la potencia requerida por dicho modo de funcionamiento.
- *potenciaReq_t* refleja la potencia que requiere el agente durante el instante de tiempo *t*. El valor se calcula a partir de los modosFunc.

El conjunto de estados objetivos del rol S^{Con*} , se obtiene a partir de los objetivos definidos en la tabla 3.4: *Con_{o1}*, *Con_{o2}*, *Con_{o3}* y *Con_{o4}* haciendo uso de los criterios de elección de productores *criterioElecciónProd*. El primero de ellos consiste en minimizar el impacto medioambiental del proceso de producción de energía eléctrica. Este objetivo se obtiene seleccionando a los agentes productores que menor impacto medioambiental producen, formalmente se representa $eEcológico = \text{Min}(\sum_{i=0}^n A_i \cdot potenciaSalida * A_i \cdot toxicidad)$, siendo *n* el número de agentes que implementan el rol *Prod* y $A_i \in Prod$ cada uno de los agentes productores que pueden proporcionar energía eléctrica. El segundo estado objetivo persigue minimizar el coste económico de la energía comprada, lo que formalmente se puede reflejar como $eEconómico = \text{Min}(\sum_{i=0}^n A_i \cdot potenciaSalida * A_i \cdot precioUnitVenta)$, siendo *n* el número de agentes que implementan el rol productor y A_i cada uno de los agentes productores que puede proporcionar energía eléctrica. El tercer estado objetivo persigue satisfacer las restricciones eléctricas que garanticen el correcto desempeño de las funcionalidades evitando disminuir la satisfacción de los usuarios. Para alcanzar tal objetivo se deben deshabilitar solamente aquellos modos de funcionamiento que presenten una importancia baja. Formalmente, queda $eSatisfacción = \text{Max}(\sum_{i=0}^m M_i \cdot importancia)$,



siendo m el número de modos de funcionamiento del centro de consumo y $M_i \in \text{ModosFunc}$ cada uno de dichos modos de funcionamiento, persiguiendo aumentar la satisfacción del usuario ejecutando los modos de funcionamiento que mayor importancia poseen. El cuarto estado objetivo supone tener en cuenta de forma equilibrada a los 3 estados anteriores y para ellos se realiza una ponderación priorizada donde a cada uno se le aplica el correspondiente factor de ponderación definido en la tupla $\text{criterioElecciónProd} \in \text{criterio}$. La definición formal se muestra en 3.36. La función $Norm$ realiza una normalización de los estados objetivos individuales: $eEcológico$, $eEconómico$ y $eSatisfacción$, para poder utilizarlos en una expresión común. La normalización es conveniente por que los dos primeros persiguen valores mínimos y el tercero valores máximos.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max}(Norm(eEcológico) * \text{ecológico.factorPonderación} / 100 \\
 & \quad + Norm(eEconómico) \\
 & \quad * \text{económico.factorPonderación} / 100 \\
 & \quad + Norm(eSatisfacción) \\
 & \quad * \text{satisfacción.factorPonderación} / 100)
 \end{aligned}
 \tag{3.36}$$

El conjunto de operaciones P^{Con} está compuesto por las operaciones que el rol es capaz de solicitar o de servir y que desencadenan mecanismos de negociación colectivos. Es capaz de realizar las siguientes operaciones con los agentes que implementan el rol $prod$, ya sea como solicitante o como solicitado:

- $solicitarPotencia$ permite solicitar a los roles $prod$ si son capaces de suministrar una determinada potencia eléctrica durante un periodo de tiempo concreto.
- $responderSolicitudReducciónConsumo$ permite responder a las solicitudes de reducción de consumo efectuadas por los agentes que implementan el rol $prod$.
- $responderSolicitudCompra$ permite responder a las solicitudes de compra de potencia enviadas por los agentes que implementan el rol $prod$.

La aplicación $Decide^{Con}$ que determina la toma de decisiones del rol Con persigue los estados objetivos S^{Con*} .



$$Con = \langle R^{Con}, S^{Con}, S^{Con*}, P^{Con}, Decide^{Con} \rangle$$

$$R^{Con} = \emptyset$$

$$S^{Con} = \{ potenciaMax \in \mathbb{C}, tensión \in \mathbb{C}, potenciaReq_t \in \mathbb{C}, \\ criterioElecciónProd \in criterio, tipoSolicitud \\ \in \mathbb{N}, modosFunc \in Funcionalidad \}$$

$$potenciaReq_t = S_{sim}.ObtenerConsumo(t)$$

$$criterio = \langle idCrit \in \mathbb{N}, factorPonderación \in \mathbb{N} \rangle$$

$$Funcionalidad =$$

$$\langle idModo \in \mathbb{N}, importancia \in \mathbb{N}, potReq \in \mathbb{C} \rangle$$

$$Intervalo = \{ \langle inicio \in Time, fin \in Time \rangle \}$$

3.37

$$S^{Con*} = \{ Min(\sum_{i=0}^n A_i.potenciaSalida * A_i.toxicidad), \\ Min(\sum_{i=0}^n A_i.potenciaSalida * \\ A_i.precioUnitVenta), Max(\sum_{i=0}^m M_i.importancia), \\ Max(Norm(eEcológico) * \frac{ecológico.factorPonderación}{100} + \\ Norm(eEconómico) * \frac{económico.factorPonderación}{100} + \\ Norm(eSatisfacción) * \frac{satisfacción.factorPonderación}{100}) \}$$

$$A_i \in Prod, \quad M_i \in ModosFunc$$

$$P^{Con} = \{ solicitarPotencia, responderSolicitudCompra, \\ responderSolicitudReducciónConsumo \}$$

Una vez definido el rol *Con* se procede a detallar el agente centro de consumo energía eléctrica, *C*, a partir de la definición de agente enunciada en 3.26, tal y como se muestra en la definición 3.38.

El conjunto de percepciones del agente fuente Φ^C está compuesto por la unión de los estados de los agentes vecinos $S^{w_i^C} \in \Upsilon^C$ y el estado de cada uno de los agentes que ofrecen servicios $S^{BA}, S^{IU}, S^{OG}, S^{SP}, S^{PM}$. El conjunto de posibles estados S^C está formado por la unión de los posibles estados del rol consumidor



S^{Con} , el atributo id , que pertenece al dominio de los números naturales e identifica al agente de forma única dentro del sistema multiagente y por el atributo k , que también pertenece a los naturales y se utiliza para denominar vecinos a los agentes que se encuentran a una distancia igual o menor a k . Por su parte, el conjunto de los estados objetivos S^{C*} coincide con los estados objetivos del rol consumidor S^{Con*} . El conjunto de operaciones que el agente centro de consumo P^C es capaz de realizar está compuesto por la unión de las operaciones que proporciona el rol consumidor P^{Con} , con las operaciones: *solicitarBúsquedaAgente* que permite la búsqueda de otros agentes dentro del sistema multiagente; *solicitarBuscarServicio* que de forma análoga permite buscar servicios ofrecidos por cualquier agente; *solicitarServicio* que permite solicitar un servicio proporcionado por los agentes del tipo *BA, IU, OG, SP, PM*; y *solicitarRegistro* que permite registrar los servicios que ofrece el agente en los agentes de búsqueda *BA*.

$$C = \langle \alpha^C, \theta^C, R^C, \gamma^C, \phi^C, S^C, S^{C*}, P^C, \\ \text{Locate}^C, \text{Percept}^C, \text{Compose}R^C, \text{Compose}\theta^C, \text{Decide}^C \rangle$$

$$R^C = \{Con\}$$

$$\phi^C = S^{v_i^C} \cup S^{BA} \cup S^{IU} \cup S^{OG} \cup S^{SP} \cup S^{PM}$$

$$S^C = S^{Con} \cup \{id \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{N}\}$$

$$S^{C*} = S^{Con*}$$

3.38

$$P^C = P^{Con} \cup \{ \text{solicitarBúsquedaAgente}, \\ \text{solicitarBúsquedaServicio}, \\ \text{solicitarServicio}, \text{solicitarRegistro} \}$$

3.2.3. Agente transpondedor de energía

T

La clase de agente transpondedor de energía, $T \subseteq A$, permite representar a los agentes que son capaces de recibir y/o suministrar energía eléctrica, pudiendo llegar a alterar alguna de las magnitudes eléctricas, almacenar o transportar la



energía eléctrica. A continuación, se procede a detallar el agente transpondedor energía eléctrica, T , a partir de la definición de agente enunciada en 3.26, tal y como se muestra en la definición 3.40.

El conjunto de roles R^T que componen al agente T está compuesto, tal y como se identificó anteriormente, por dos roles, concretamente el rol productor $Prod$ y consumidor Con de energía eléctrica. Los roles $Prod$ y Con han sido definidos en las ecuaciones 3.34 y 3.37 respectivamente en la sección de los agentes F y C .

El conjunto de percepciones del agente transpondedor Φ^T está compuesto por la unión de los estados de los agentes vecinos $S^{v_i} \in Y^T$ y el estado de cada uno de los agentes que ofrecen servicios BA, IU, OG, SP, PM .

El conjunto de posibles estados S^T está formado por la unión de los posibles estados del rol productor S^{Prod} , consumidor S^{Con} , el atributo id , que pertenece al dominio de los números naturales e identifica al agente de forma única dentro del sistema multiagente, el atributo k , que también pertenece a los naturales y se utiliza para denominar vecinos a los agentes que se encuentran a una distancia igual o menor a k . Debido a que el tipo de agente transpondedor T es capaz de representar tres tipos de dispositivos que reciben y proporcionan energía eléctrica: medios de almacenamiento, elemento de transporte o convertidor de potencia eléctrica, es conveniente añadir varios grupos de atributos que reflejan las características propias de cada tipo de dispositivo.

El comportamiento de los medios de almacenamiento se puede obtener a partir de los atributos y las restricciones definidas en (Zeng et al., 2009): $capMax \in \mathbb{R}$ que indica la cantidad máxima de energía que el agente es capaz de almacenar, de forma que si tiene valor nulo hace referencia a un elemento de transporte o adecuación de la potencia eléctrica y si es positivo hace alusión a un medio de almacenamiento, como podría ser una batería química. $estadoCarga_t \in \mathbb{R}$ representa el estado de carga del agente en el instante t . Además se identifican los atributos que hacen referencia. $razónCarga \in \mathbb{R}$ se utiliza para definir el porcentaje de corriente de la capacidad máxima a la que se puede cargar la batería. Por su parte, la $razónDescarga \in \mathbb{R}$ indica el porcentaje máximo de la capacidad de la batería a la que se puede descargar. El atributo $numCiclosCargaDescarga \in \mathbb{N}$ hace referencia a la vida útil de la batería, reflejando el número máximo de ciclos de carga/descarga que soporta. $ratioDescargaPorCiclo \in \mathbb{R}$ representa el porcentaje de la capacidad de la batería que se pierde cada vez que se realiza un ciclo de



carga/descarga. $minSOC \in \mathbb{N}$ y $maxSOC \in \mathbb{N}$ reflejan el estado de carga mínimo y máximo permitido al medio de almacenamiento.

El atributo específico de los elementos de transporte de potencia es $impedancia \in \mathbb{C}$ que hace referencia a la impedancia de la línea de transmisión, cuya parte real contiene la resistencia de la línea al paso de corriente. Se utiliza para calcular las pérdidas eléctricas derivadas del efecto Joule.

Los convertidores, al igual que los elementos de transporte, únicamente requieren un atributo adicional $eficiencia \in \mathbb{R}$ que refleja el porcentaje de la potencia de entrada que es suministrada después de haber sido convertida.

$$T_{o1} = \begin{cases} \frac{potenciaReq_t}{eficiencia} - potenciaSal_t \leq maxSOC - estadoCarga_t, & batDescargada \\ \frac{potenciaReq_t}{eficiencia} \equiv potenciaSal_t, & batCargada \vee convertidor \\ potenciaReq_t \equiv potenciaSal_t + pérdidas, & línea \end{cases}$$

$$potenciaReq_t = Con.potenciaReq_t$$

$$potenciaSal_t = Prod.potenciaSal_t$$

$$pérdidas = (potenciaReq_t / tension)^2 * impedancia \quad 3.39$$

$$batDescargada \equiv minSOC \leq estadoCarga_t < maxSOC$$

$$batCargada \equiv estadoCarga_t == maxSOC$$

$$línea \equiv capMax == 0 \wedge impedancia \neq (0,0)$$

$$convertidor \equiv capMax = 0 \wedge eficiencia \neq 0$$

$$estadoCarga_t, capMax, eficiencia \in \mathbb{R}$$

$$potenciaReq_t, potenciaSal_t, impedancia, pérdidas \in \mathbb{C}$$

El conjunto de estados objetivos S^{T*} , se obtiene a partir de los objetivos definidos en la tabla 3.6: T_{o1} , $Prod_{o1}$, $Prod_{o2}$, Con_{o1} , Con_{o2} y Con_{o3} . El objetivo T_{o1} se encuentra definido formalmente en 3.39. Se encarga de dar mayor o menor prioridad a los estados objetivos derivados tanto del rol productor S^{Prod*} y al rol consumidor S^{Con*} . Consiste en mantener constante el balance energético entre la entrada y salida de potencia, cuando existe demanda energética, y cuando no la



hay el objetivo es aumentar el estado de carga del medio de almacenamiento. La función objetivo tiene en cuenta los tres tipos de dispositivos que el agente transpondedor es capaz de representar. Se define *bateriaDescargada* como el estado de las baterías de almacenamiento cuando están descargadas. En este estado ha de conseguir un aporte energético, teniendo en cuenta la eficiencia de la carga/descarga, tal que restándole la potencia que proporciona sea menor o igual que la capacidad disponible, $potenciaReq_t/eficiencia - potenciaSal_t \leq maxSOC - estadoCarga_t$. En el caso de que el estado de carga esté al máximo o se trate de un convertidor de potencia, *batCargada* v *convertidor*, el aporte energético de entrada ha de ser equivalente al de salida, teniendo en cuenta la eficiencia del proceso, $potenciaReq_t/eficiencia \equiv potenciaSal_t$. Tratándose de una línea de transmisión, *línea*, únicamente se tienen en cuenta las pérdidas eléctricas por el efecto Joule, por lo que la potencia de entrada ha de ser equivalente a la suma de la potencia de salida y las pérdidas, $potenciaReq_t \equiv potenciaSal_t + pérdidas$.

El conjunto de operaciones que el agente transpondedor de energía eléctrica P^T es capaz de realizar está compuesto por la unión de las operaciones que proporciona el rol productor P^{Prod} y consumidor P^{Con} , con las operaciones: *solicitarBúsquedaAgente* que permite la búsqueda de otros agentes dentro del sistema multiagente; *solicitarBuscarServicio* que de forma análoga permite buscar servicios ofrecidos por cualquier agente; *solicitarServicio* que permite solicitar un servicio proporcionado por los agentes del tipo *BA, IU, OG, SP, PM*; y *solicitarRegistro* que permite registrar los servicios que ofrece el agente en los agentes de búsqueda *BA*.

$$T = \langle \alpha^T, \theta^T, R^T, \gamma^T, \phi^T, S^T, S^{T*}, P^T, \\ Locate^T, Percept^T, ComposeR^T, Compose\theta^T, Decide^T \rangle$$

$$R^T = \{Prod, Con\}$$

3.40

$$\phi^T = S^{v_i^T} \cup S^{BA} \cup S^{IU} \cup S^{OG} \cup S^{SP} \cup S^{PM}$$



$$\begin{aligned}
 S^T &= S^{Prod} \cup S^{Con} \cup \{id \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{N}, capMax \in \mathbb{R}, \\
 &\quad estadoCarga_t \in \mathbb{R}, razónCarga \in \mathbb{R}, \\
 &\quad razónDescarga \in \mathbb{R}, \\
 &\quad numCiclosCargaDescarga \in \mathbb{N}, \\
 &\quad ratioDescargaPorCiclo \in \mathbb{R}, \\
 &\quad minSOC \in \mathbb{N}, maxSOC \in \mathbb{N}, impedancia \in \mathbb{C}, \\
 &\quad eficiencia \in \mathbb{R}\} \\
 S^{T*} &= S^{Prod*} \cup S^{Con*} \cup \{T_{01}\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p^T &= p^{Prod} \cup p^{Con} \\
 &\cup \{solicitarBusquedaAgente, solicitarBúsquedaServicio, \\
 &\quad solicitarServicio, solicitarRegistro\}
 \end{aligned}$$

3.2.4. Agente búsqueda de agentes *BA*

La clase agente de búsqueda de agentes, $BA \subseteq A$, permite representar a todos aquellos que proporcionan servicios de búsqueda tanto de agentes como de los servicios que prestan. En este caso, el conjunto de roles R^{BA} que componen al tipo de agente BA está compuesto, tal y como se identificó anteriormente, por un único rol, concretamente el rol *Serv* que permite ofrecer un único servicio auxiliar al resto de clases agentes. En el caso de que una clase de agente tenga que proporcionar varios servicios, tendrá que implementar un rol de tipo *Serv* por cada uno de los servicios que quiera ofrecer. Antes de continuar con la definición del tipo de agente BA es conveniente definir el rol *Serv*, ya que dicho rol será empleado por las clases de agente BA, IU, OG, SP, PM .

La definición del rol *Serv* se muestra en la definición 3.41. Se puede observar que el conjunto finito de posibles roles R^{Serv} que componen al rol *Serv* se encuentra vacío, ya que este rol no está compuesto por ningún otro, por lo que al igual que el resto de roles definidos es un rol primitivo.

El conjunto de posibles estados S^{Serv} está compuesto por las combinaciones de los atributos con los posibles valores que pueden tener. Se especifican los



atributos que componen el estado del rol y el dominio de los posibles valores que se pueden dar. Se distinguen los siguientes atributos:

- *idServicio* identifica al servicio ofrecido por el rol. Su dominio pertenece a \mathbb{N} .
- *descripción* ofrece una descripción del servicio ofrecido y su dominio pertenece a las cadenas de texto *String*.
- *numParámetros* indica el número de parámetros que requiere el servicio.
- *descParámetros* muestra el dominio de cada uno de los parámetros que requiere el servicio. El dominio está compuesto por el conjunto de tuplas de tipo *TipoParámetro* = $\{ \langle idParam, domParam, descParam \rangle \}$, de forma que el primer elemento representa al identificador del parámetro, el segundo el dominio de valores que puede tomar, pudiendo ser uno de los siguientes elementos $\{bool, \mathbb{N}, \mathbb{R}, \mathbb{C}, Time, String\}$ y el tercero indica el cometido del parámetro.
- *protocoloInteracción* muestra el protocolo de interacción que requiere el servicio para poder ser utilizado. El conjunto de protocolos de interacción disponibles que pueden ser utilizados son los definidos en la especificación FIPA (FIPA, 2002b). El dominio de este atributo es *String*, donde cada valor identifica a cada uno de los protocolos del siguiente conjunto $\{Request, RequestWhen, Query, Propose, Contract - net, Contract - net iterated, Brokering, Recruiting, Subscribe, EnglishAuction, DutchAuction\}$

El conjunto de estados objetivos del rol S^{Serv*} , se obtiene a partir del objetivo definido en la tabla 3.4: $Serv_{o1}$, que consiste en maximizar el uso del servicio proporcionado, por lo que siempre que sea posible responderá las solicitudes del servicio, formalmente el objetivo se representa *reply responderSolicitudServicio*.

El conjunto de operaciones P^{Serv} está compuesto por las operaciones que el rol es capaz de solicitar o de servir y que desencadenan los protocolos de interacción apropiados en cada caso. Es capaz de realizar las siguientes operaciones independientemente de la clase de agente que las solicite:

- *solicitarRegistro* permite registrar el servicio ofrecido en cualquier agente de búsqueda de agentes, de forma que otros agentes puedan descubrir el servicio registrado previamente y utilizarlo. Esta operación es implementada por el rol *Serv*, que a su vez será utilizado por todas las clases de agentes que proporcionen servicios auxiliares, incluyendo la clase de agente de búsqueda de agentes, *BA*. En este caso, no tiene sentido que el propio agente de búsqueda de agentes registre su propio servicio de búsqueda en sí mismo, ya



que no aportaría ninguna ventaja. En un escenario en el que existan diversos agentes de búsqueda, sería conveniente que cada uno de ellos estuviera registrado en el resto, de forma que el resto de clases de agente conociendo a priori únicamente al agente BA más cercano, sea capaz de acceder al resto de agentes BA.

- *responderSolicitudServicio* permite responder a las solicitudes de servicio enviadas por cualquier clase de agente. En función del valor de los parámetros enviados y del propio estado del agente que ha instanciado el rol *Serv*, este responde de forma apropiada utilizando el protocolo de interacción definido al instanciar el rol *Serv*.

La aplicación *Decide^{Serv}* determina la toma de decisiones del rol *Serv* persiguiendo los estados objetivos *S^{Serv*}*.

$$Serv = \langle R^{Serv}, S^{Serv}, S^{Serv*}, P^{Serv}, Decide^{Serv} \rangle$$

$$R^{Serv} = \emptyset$$

$$S^{Serv} = \{ idServicio \in \mathbb{N}, \quad descripción \in String, \\ numParámetros \in \mathbb{N}, \\ descParámetros \in TipoParámetros, \\ protocoloInteracción \in \{Request, \\ RequestWhen, \quad Query, \quad Propose, \\ Contract - net, \quad Contract - net iterated, \quad 3.41 \\ Brokering, \quad Recruiting, \quad Subscribe, \\ EnglishAuction, \quad DutchAuction \}\}$$

$$TipoParámetros = \\ \{ \langle idParam \in \mathbb{N}, domParam \in \{bool, \mathbb{N}, \mathbb{R}, \mathbb{C}, Time, String\}, \\ descParam \in String \rangle \}$$

$$S^{Serv*} = \{ reply responderSolicitudServicio \}$$

$$P^{Serv} = \{ solicitarRegistro, responderSolicitudServicio \}$$

Una vez definido el rol *Serv* se procede a detallar el agente de búsqueda de agentes, *BA*, a partir de la definición de agente enunciada en 3.26, tal y como se muestra en la definición 3.45. Debido a que el agente proporciona tres servicios diferenciados: *buscarAgente*, *buscarServicio* y *registrar*, se necesita crear 3



instancias del rol *Serv*, denominados *Serv:buscarAgente*, *Serv:buscarServicio* y *Serv:registrar*. Al instanciar el rol *Serv* únicamente se han de definir el estado del rol $S^{Serv} \in Serv:buscarAgente$ con los atributos que identifican el servicio ofrecido y los parámetros requeridos para poder ser invocado por otro agente.

$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in Serv : buscarAgente = \\
 \{ idServicio = 1, \quad & descripción = búsqueda de agentes, \\
 \quad numParámetros = 1, \quad & descParámetros \quad \quad \quad 3.42 \\
 = \{ < idAgente, \mathbb{N}, \text{el agente a buscar} >, \\
 \quad & protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}$$

El servicio búsqueda de agentes *Serv:buscarAgente* está especificado en la definición 3.42, donde cabe destacar que únicamente necesita el parámetro $idAgente \in \mathbb{N}$, que identifica de forma única al agente dentro del sistema.

El servicio búsqueda de servicios *Serv:buscarServicio* está especificado en la definición 3.43, donde cabe destacar que requiere dos parámetros, el parámetro $idServicio \in \mathbb{N}$ para buscar el servicio dotado de ese identificador y el parámetro $idAgente \in \mathbb{N}$ es opcional, ya que permite refinar la búsqueda especificando el agente que lo proporciona.

$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in Serv: buscarServicio = \\
 \{ idServicio = 2, \quad & descripción = búsqueda de servicios, \\
 \quad numParámetros = 2, \\
 \quad & descParámetros = \{ \quad \quad \quad 3.43 \\
 \quad & \quad < idAgente, \mathbb{N}, \text{el agente que lo proporciona} >, \\
 \quad & \quad < idServicio, \mathbb{N}, \text{el servicio a buscar} >, \\
 \quad & protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}$$

El servicio de registro *Serv:registrar* permite que cualquier clase de agente registre los servicios que proporciona. Se encuentra especificado en la definición 3.44, donde cabe destacar que requiere dos parámetros. El parámetro $idAgente \in \mathbb{N}$ identifica al agente que quiere ser registrado y el parámetro $idServicio \in \mathbb{N}$ es opcional e identifica el servicio a registrar y el parámetro.



$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in Serv: registrar = \\
 \{ idServicio = 3, descripción = registra un servicio, \\
 numParámetros = 2, \\
 descParámetros = \{ \hspace{15em} 3.44 \\
 < idAgente, \mathbb{N}, \text{el agente que lo proporciona} >, \\
 < idServicio, \mathbb{N}, \text{el servicio a registrar} >\}, \\
 protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}$$

El conjunto de percepciones del agente búsqueda de agentes Φ^{BA} está compuesto por la unión de los estados de todos los agentes que forman el sistema multiagente: los que gestionan potencia eléctrica S^F , S^T , S^C y los que ofrecen servicios auxiliares S^{BA} , S^{IU} , S^{OG} , S^{SP} , S^{PM} . El conjunto de posibles estados S^{BA} está formado por la unión de los posibles estados del rol proporcionar servicio buscar agente, $S^{Serv:buscarAgente}$, el rol proporcionar servicio de búsqueda de servicios, $S^{Serv:buscarServicio}$, el rol proporcionar servicio registrar $S^{Serv:registrar}$ y el atributo id , que pertenece al dominio de los números naturales, e identifica al agente de forma única dentro del sistema multiagente. Por su parte, el conjunto de los estados objetivos S^{BA*} coincide con la unión de los estados objetivos del rol servicio buscar agente $S^{Serv:buscarAgente*}$, el rol servicio buscar servicio $S^{Serv:buscarServicio*}$ y el rol servicio registrar $S^{Serv:registrar*}$. El conjunto de operaciones que el agente búsqueda de agentes P^{BA} es capaz de realizar está compuesto por la unión de las operaciones que proporcionan: el rol servicio buscar agente $p^{Serv:buscarAgente}$, el rol servicio buscar servicio $p^{Serv:buscarServicio}$, el rol servicio registrar $p^{Serv:registrar}$ y la operación $solicitarServicio$ que permite solicitar un servicio proporcionado por los agentes del tipo BA, IU, OG, SP, PM .

$$\begin{aligned}
 BA = < \alpha^{BA}, \Theta^{BA}, R^{BA}, \gamma^{BA}, \Phi^{BA}, S^{BA}, S^{BA*}, p^{BA}, \\
 Locate^{BA}, Percept^{BA}, ComposeR^{BA}, Compose\Theta^{BA}, Decision^{BA} > \\
 R^{BA} \\
 = \{Serv: buscarAgente, Serv: buscarServicio, Serv: registrar\} \hspace{2em} 3.45
 \end{aligned}$$

$$\Phi^{BA} = S^F \cup S^T \cup S^C \cup S^{BA} \cup S^{IU} \cup S^{OG} \cup S^{SP} \cup S^{PM}$$

$$\begin{aligned}
 S^{BA} = S^{Serv:buscarAgente} \cup S^{Serv:buscarServicio} \cup S^{Serv:registrar} \\
 \cup \{id \in \mathbb{N}\}
 \end{aligned}$$



$$S^{BA*} = S^{Serv:buscarAgente*} \cup S^{Serv:buscarServicio*} \cup S^{Serv:registrar*}$$

$$P^{BA} = P^{Serv:buscarAgente} \cup P^{Serv:buscarServicio} \cup P^{Serv:registrar} \\ \cup \{ solicitarServicio \}$$

3.2.5. Agente interfaz de usuario *IU*

La clase agente interfaz de usuario, $IU \subseteq A$, permite instanciar a los agentes que permiten a los usuarios del sistema interactuar con él, haciendo de intermediario en las acciones que solicita el usuario y el resto de agentes que conforman el sistema multiagente. Utiliza mecanismos de seguridad basados en autenticación para garantizar el acceso al sistema de forma restringida, siendo el propio agente interfaz de usuario el que regula el acceso a los servicios. El conjunto de roles R^{IU} que componen al tipo de agente *IU* está compuesto, tal y como se identificó anteriormente, por un único rol, concretamente el rol *Serv* que del que se crean diversas instancias para proporcionar los distintos servicios que ofrece el agente *IU*.

A partir de la definición de agente enunciada en 3.26, tal y como se muestra en la definición 3.50 se procede a detallar el agente interfaz de usuario, *IU*, instanciando el rol *Serv*. El agente *IU* proporciona cuatro servicios diferenciados: *iniciarSesión*, *terminarSesión*, *mostrarInterfaz* y *manejarEvento*, por lo que requiere crear cuatro instancias del rol *Serv*, denominados: *Serv:iniciarSesión*, *Serv:terminarSesión*, *Serv:mostrarInterfaz* y *Serv:manejarEvento*. Los dos primeros encargan de gestionar todo lo relativo a la autenticación y el control de acceso al resto de servicios que ofrece el agente. El servicio *Serv:mostrarInterfaz* ofrece al usuario los diversos medios de interacción con el sistema, de forma que el agente es capaz de gestionar las solicitudes que el usuario realiza a través del servicio *Serv:manejarEvento* que recoge dichas acciones y realiza las gestiones oportunas con los agentes que se encuentren involucrados.

El servicio iniciar sesión *Serv:iniciarSesion* está especificado en la definición 3.46, donde cabe destacar que necesita los parámetros $idUsuario \in String$ y $contraseña \in String$ que respectivamente identifican de forma unívoca al usuario dentro del sistema y contiene la clave secreta que es conocida únicamente por el legítimo usuario. Aunque el dominio de la contraseña sea una cadena de texto,



dicha cadena puede contener una contraseña alfanumérica tradicional o representar un reconocimiento biométrico proporcionado por algún dispositivo de reconocimiento de características biométricas.

$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in Serv: iniciarSesión = \\
 \{ idServicio = 4, \quad descripción = autentica\ al\ usuario, \\
 \quad numParámetros = 2, \\
 \quad descParámetros = \{ \hspace{15em} 3.46 \\
 \quad \quad < idUsuario, String, identificador >, \\
 \quad \quad < contraseña, String, clave\ secreta > \}, \\
 \quad protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}$$

El servicio terminar sesión *Serv:terminarSesión* permite a un usuario que previamente ha sido autenticado mediante el servicio iniciar sesión finalizar el proceso de interacción con el sistema. La definición del servicio se muestra en la definición 3.47, donde únicamente requiere como parámetro el identificador del usuario que desea terminar la sesión.

$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in Serv: terminarSesión = \\
 \{ idServicio = 5, \quad descripción = desconecta\ al\ usuario, \\
 \quad numParámetros = 1, \\
 \quad descParámetros = \{ \hspace{15em} 3.47 \\
 \quad \quad < idUsuario, String, identificador > \}, \\
 \quad protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}$$

El servicio mostrar interfaz *Serv:mostrarInterfaz* permite al agente visualizar los distintos elementos que componen la interfaz de usuario para permitir el control y monitorización del sistema. Los atributos que componen el estado del servicio se muestra en la definición 3.48, donde únicamente requiere como parámetro el elemento de interfaz a ofrecer al usuario.



$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in Serv: mostrarInterfaz = & \\
 \{ idServicio = 6, & \\
 & descripción = ofrece al usuario la interfaz, \\
 & numParámetros = 1, & 3.48 \\
 & descParámetros = \{ \\
 & \langle interfazUsuario, ElementoInterfaz, \\
 & uso y monitorización \rangle \}, \\
 & protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}$$

El servicio manejar eventos $Serv: manejarEventos$ permite al sistema reconocer los eventos que desencadena el usuario para efectuar cada una de las acciones tanto de control como de monitorización. La definición del servicio se muestra en la definición 3.49, donde requiere como parámetro el evento, $evento \in Evento$ realizado por el usuario.

$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in Serv: manejarEvento = & \\
 \{ idServicio = 7, & \\
 & descripción = gestiona los eventos del usuario, \\
 & numParámetros = 1, & 3.49 \\
 & descParámetros = \{ \\
 & \langle evento, Evento, evento desencadenado \rangle \}, \\
 & protocoloInteracción = Subscribe \}
 \end{aligned}$$

El conjunto de percepciones del agente interfaz de usuario Φ^{IU} está compuesto por la unión de los estados de todos los agentes que forman el sistema multiagente: los que gestionan potencia eléctrica S^F , S^T , S^C y los que ofrecen servicios auxiliares S^{BA} , S^{IU} , S^{OG} , S^{SP} , S^{PM} . El conjunto de posibles estados S^{IU} está formado por la unión de los posibles estados de los diversos roles implementados: $S^{Serv: iniciarSesión}$, $S^{Serv: terminarSesión}$, $S^{Serv: mostrarInterfaz}$ y $S^{Serv: manejarEvento}$, además del atributo id , que pertenece al dominio de los números naturales, e identifica al agente de forma única dentro del sistema multiagente. Por su parte, el conjunto de los estados objetivos S^{IU*} coincide con la unión de los estados objetivos de los roles instanciados: $S^{Serv: iniciarSesión*}$, $S^{Serv: terminarSesión*}$, $S^{Serv: mostrarInterfaz*}$ y $S^{Serv: manejarEvento*}$. El conjunto de operaciones que el agente búsqueda de agentes P^{IU} es capaz de realizar está compuesto por la unión de las operaciones que proporcionan el conjunto de roles:



$p^{Serv:iniciarSesión}$, $p^{Serv:terminarSesión}$, $p^{Serv:mostrarInterfaz}$, $p^{Serv:manejarEvento}$ y la operación $solicitarServicio$ que permite solicitar un servicio proporcionado por los agentes del tipo BA, IU, OG, SP, PM .

$$IU = \langle \alpha^{IU}, \theta^{IU}, R^{IU}, \gamma^{IU}, \Phi^{IU}, S^{IU}, S^{IU*}, P^{IU}, \\ Locate^{IU}, Percept^{IU}, ComposeR^{IU}, Compose\theta^{IU}, Decision^{IU} \rangle$$

$$R^{IU} = \{Serv: iniciarSesion, Serv: terminarSesión, \\ Serv: mostrarInterfaz, \\ Serv: manejarEvento\}$$

$$\Phi^{IU} = S^F \cup S^T \cup S^C \cup S^{BA} \cup S^{IU} \cup S^{OG} \cup S^{SP} \cup S^{PM}$$

$$S^{IU} = S^{Serv:iniciarSesión} \cup S^{Serv:terminarSesión} \quad 3.50 \\ \cup S^{Serv:mostrarInterfaz} \cup S^{Serv:manejarEvento} \\ \cup \{id \in \mathbb{N}\}$$

$$S^{IU*} = S^{Serv:iniciarSesión*} \cup S^{Serv:terminarSesión*} \\ \cup S^{Serv:mostrarInterfaz*} \cup S^{Serv:manejarEvento*}$$

$$P^{IU} = p^{Serv:iniciarSesión} \cup p^{Serv:terminarSesión} \\ \cup p^{Serv:mostrarInterfaz} \cup p^{Serv:manejarEvento} \\ \cup \{solicitarServicio\}$$

3.2.6. Agente de optimización global OG

La clase agente de optimización global, $OG \subseteq A$, permite crear instancias de agentes con el cometido de optimizar la distribución eléctrica teniendo en cuenta la totalidad de la red. Utiliza como punto de partida la distribución eléctrica obtenida a través de los procesos de negociación colectiva entre las clases de de agentes F, T y C . Dicha distribución eléctrica tiene la particularidad de que está optimizada de forma local, es decir, cada agente elige el productor de energía eléctrica óptimo de acuerdo a sus propios criterios, teniendo en cuenta únicamente a los productores directamente conectados, llamados vecinos. Los requerimientos computacionales necesarios para obtener una solución cercana a la óptima, sobre todo en grandes redes eléctricas, hacen que este agente



solamente sea útil en los escenarios en los que se pueda obtener una solución cercana a la óptima en un tiempo acotado.

El conjunto de roles R^{OG} que componen al tipo de agente OG está compuesto, tal y como se identificó anteriormente, por un único rol, concretamente el rol $Serv$ del que se crean diversas instancias para proporcionar los distintos servicios que ofrece el agente IU .

A partir de la definición de agente enunciada en 3.26, se procede a detallar el agente de optimización global, OG tal y como se muestra en la definición 3.52. El agente OG proporciona únicamente el servicio *optimizaciónGlobal* que necesita crear una única instancia del rol $Serv$, que es denominado $Serv: optimizaciónGlobal$, que obtiene la distribución eléctrica inicial, a través del estado de los agentes de tipo F , T y C inmediatamente después del proceso de negociación colectiva.

$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in Serv: optimizaciónGlobal = \\
 \{ idServicio = 8, \quad descripción = optimiza de forma global, \\
 numParámetros = 0, \quad descParámetros = \emptyset, \\
 protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}
 \tag{3.51}$$

El servicio iniciar sesión $Serv: optimizaciónGlobal$, especificado en la definición 3.51, no necesita ningún parámetro ya que la solución inicial la obtiene a través del estado de los agentes que gestionan potencia eléctrica obtenido a través de las percepciones que tiene el agente optimización global ϕ^{OG} .

El conjunto de percepciones del agente interfaz de usuario ϕ^{OG} está compuesto por la unión de los estados de todos los agentes que gestionan potencia eléctrica S^F , S^T , S^C . El conjunto de posibles estados S^{OG} está formado por la unión de los posibles estados del rol implementado: $S^{Serv: optimizaciónGlobal}$, el atributo id , que pertenece al dominio de los números naturales, e identifica al agente de forma única dentro del sistema multiagente, $tComputo$ que contiene el tiempo que se puede dedicar a los cálculos computaciones de la optimización y el atributo $criteriosOptimización \in Criterio$ que almacena los diversos criterios a optimizar con su correspondiente factor de ponderación. Se distinguen tres criterios: que coinciden parcialmente con los establecidos en los criterios de elección de productor del rol Con : ecológico, económico y satisfacción a los que se les puede asociar su correspondiente factor de ponderación. El conjunto de los estados objetivos S^{OG*} coincide con los estados objetivos del rol instanciado: $S^{Serv: optimizaciónGlobal*}$. El conjunto de operaciones que el agente búsqueda de



agentes P^{OG} es capaz de realizar está compuesto por las operaciones que proporcionan el rol instanciado $p^{Serv:optimizaciónGlobal}$ y la operación $solicitarServicio$ que permite solicitar un servicio proporcionado por los agentes del tipo BA, IU, SP, PM .

$$OG = \langle \alpha^{OG}, \theta^{OG}, R^{OG}, \gamma^{OG}, \phi^{OG}, S^{OG}, S^{OG*}, P^{OG}, \\ Locate^{OG}, Percept^{OG}, ComposeR^{OG}, Compose\theta^{OG}, Decision^{OG} \rangle$$

$$R^{OG} = \{Serv: optimizaciónGlobal\}$$

$$\phi^{OG} = S^F \cup S^T \cup S^C$$

$$S^{OG} = S^{Serv:optimizaciónGlobal} \cup \{id \in \mathbb{N}, criteriosOptimización \in Criterio, tComputo \in Time\} \quad 3.52$$

$$Criterio = \langle idCrit \in \mathbb{N}, factorPonderación \in \mathbb{N} \rangle$$

$$S^{OG*} = S^{Serv:optimizaciónGlobal*}$$

$$P^{OG} = p^{Serv:optimizaciónGlobal} \cup \{solicitarServicio\}$$

3.2.7. Agente simulación de potencia SP

La clase agente simulación de potencia, $SP \in A$, permite instanciar a los agentes que simulan la potencia eléctrica que cada agente de tipo C requiere y la que cada agente de tipo F es capaz de generar. La simulación de la potencia que se es capaz de generar es de especial importancia para aquellos agentes que representan fuentes de energía que dependen de factores externos, como pueden ser las condiciones climáticas.

El conjunto de roles R^{SP} que componen al tipo de agente SP está compuesto, tal y como se identificó anteriormente, el rol $Serv$ del que se crean diversas instancias para proporcionar los distintos servicios que ofrece el agente IU .

Se procede a detallar el agente simulación de potencia requerida y generada, SP , a partir de la definición de agente enunciada en 3.26, tal y como se muestra en la definición 3.55. El agente SP proporciona dos servicios diferenciados: $simularConsumo$ y $simularGeneración$, por lo que requiere crear dos instancias del



rol *Serv*, denominadas: *Serv: simularConsumo* y *Serv: simularGeneración*. El primero se encarga de simular la potencia requerida por aquellos agentes de tipo *C* que lo soliciten. El segundo simula para cada uno de los agentes de tipo *F* que lo soliciten la potencia eléctrica que es capaz de generar durante un periodo de tiempo.

$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in \text{Serv: simularConsumo} = & \\
 \{ idServicio = 9, & \\
 & descripción = \textit{simula el consumo energético}, \\
 & numParámetros = 3, \\
 & descParámetros = \{ & 3.53 \\
 & \langle idAgente, \mathbb{N}, \textit{identificador del agente} \rangle, \\
 & \langle inicio, Time, \textit{comienzo del periodo} \rangle, \\
 & \langle fin, Time, \textit{fin del periodo} \rangle \}, \\
 & protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}$$

El servicio iniciar sesión *Serv: simularConsumo* está especificado en la definición 3.53, donde cabe destacar que necesita tres parámetros: $idAgente \in \mathbb{N}$, $inicio \in Time$ y $fin \in Time$ que respectivamente identifican de forma unívoca al agente dentro del sistema, y el inicio y fin del periodo de tiempo a simular.

$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in \text{Serv: simularGeneración} = & \\
 \{ idServicio = 10, & \\
 & descripción = \textit{simula la potencia disponible}, \\
 & numParámetros = 3, \\
 & descParámetros = \{ & 3.54 \\
 & \langle idAgente, \mathbb{N}, \textit{identificador del agente} \rangle, \\
 & \langle inicio, Time, \textit{comienzo del periodo} \rangle, \\
 & \langle fin, Time, \textit{fin del periodo} \rangle \}, \\
 & protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}$$

El servicio iniciar sesión *Serv: simularGeneración* está especificado en la definición 3.54, donde, al igual que el servicio anterior, necesita tres parámetros: $idAgente \in \mathbb{N}$, $inicio \in Time$ y $fin \in Time$ que respectivamente identifican de forma unívoca al agente dentro del sistema, y el inicio y fin del periodo de tiempo a simular.



El conjunto de percepciones del agente simulación de potencia de consumo y generación Φ^{SP} está compuesto por la unión de los estados de los agentes que gestionan potencia eléctrica S^F , S^T , S^C . El conjunto de posibles estados S^{SP} está formado por la unión de los posibles estados de los diversos roles implementados: $S^{Serv:simularConsumo}$ y $S^{Serv:simularGeneración}$, además del atributo id , que pertenece al dominio de los números naturales, e identifica al agente de forma única dentro del sistema multiagente. El conjunto de los estados objetivos S^{SP*} coincide con la unión de los estados objetivos de los roles instanciados: $S^{Serv:simularConsumo*}$ y $S^{Serv:simularGeneración*}$. El conjunto de operaciones que el agente búsqueda de agentes P^{SP} es capaz de realizar está compuesto por la unión de las operaciones que proporcionan el conjunto de roles: $p^{Serv:simularConsumo}$, $p^{Serv:simularGeneración}$ y la operación $solicitarServicio$ que permite solicitar un servicio proporcionado por los agentes del tipo BA, IU, OG, PM .

$$SP = \langle \alpha^{SP}, \Theta^{SP}, R^{SP}, \Upsilon^{SP}, \Phi^{SP}, S^{SP}, S^{SP*}, P^{SP}, \\ Locate^{SP}, Percept^{SP}, ComposeR^{SP}, Compose\Theta^{SP}, Decision^{SP} \rangle$$

$$R^{SP} = \{Serv: simularConsumo, Serv: simularGeneración\}$$

$$\Phi^{SP} = S^F \cup S^T \cup S^C$$

$$S^{SP} = S^{Serv:simularConsumo} \cup S^{Serv:simularGeneración} \cup \{id \in \mathbb{N}\}$$

3.55

$$S^{SP*} = S^{Serv:simularConsumo*} \cup S^{Serv:simularGeneración*}$$

$$P^{SP} = p^{Serv:simularConsumo} \cup p^{Serv:simularGeneración} \\ \cup \{solicitarServicio\}$$

3.2.8. Agente de predicción meteorológica PM

La clase agente de predicción meteorológica, $PM \subseteq A$, permite crear instancias de agentes con el cometido obtener las predicciones meteorológicas de una zona geográfica determinada. La información obtenida es de especial relevancia para los agentes del tipo SP , ya que tanto el consumo como la

generación de fuentes de energía renovables dependen en gran medida de las condiciones climatológicas.

El conjunto de roles R^{PM} que componen al tipo de agente PM está compuesto, tal y como se identificó anteriormente, por un único rol, concretamente el rol $Serv$ que del que se crean las correspondientes instancias para proporcionar los distintos servicios que ofrece el agente IU .

A partir de la definición de agente enunciada en 3.26, procede a detallar el agente de predicción meteorológica, PM tal y como se muestra en la definición 3.57. El agente PM proporciona únicamente el servicio $obtenerPrevisiónMet$ que necesita crear una única instancia del rol $Serv$, denominado $Serv: obtenerPrevisiónMet$.

$$\begin{aligned}
 S^{Serv} \in Serv: obtenerPrevisión = \\
 \{ idServicio = 11, \\
 \quad descripción = obtiene datos meteorológicos, \\
 \quad numParámetros = 4, \\
 \quad descParámetros = \{ \\
 \quad \quad < latitud, \mathbb{R}, latitud de la ubicación >, \\
 \quad \quad < longitud, \mathbb{R}, longitud de la ubicación >, \\
 \quad \quad < inicio, Time, inicio del periodo >, \\
 \quad \quad < fin, Time, fin del periodo > \}, \\
 \quad protocoloInteracción = Request \}
 \end{aligned}
 \tag{3.56}$$

El servicio iniciar sesión $Serv: obtenerPrevisiónMet$, especificado en la definición 3.56, requiere cuatro parámetros. Los dos primeros, $longitud \in \mathbb{R}$ y $latitud \in \mathbb{R}$, hacen referencia a las coordenadas de ubicación geográfica. En cambio, los otros dos, $inicio \in Time$ y $fin \in Time$, hacen referencia al periodo de tiempo sobre el que se obtienen los datos de previsión meteorológica.

El conjunto de percepciones del agente interfaz de usuario Φ^{PM} está compuesto por la unión de los estados de todos los agentes que gestionan potencia eléctrica S^F, S^T, S^C . El conjunto de posibles estados S^{PM} está formado por la unión de los posibles estados del rol implementado: $S^{Serv: obtenerPrevisiónMet}$, los posibles valores de los atributos: radiación solar media $radiaciónSolar \in \mathbb{R}$, velocidad media del viento $velocidadViento \in \mathbb{R}$, la humedad relativa media $humedadRelativa \in \mathbb{R}$, las precipitaciones por lluvias $precipitaciónLluvia \in \mathbb{R}$ e id ,



que pertenece al dominio de los números naturales, e identifica al agente de forma única dentro del sistema multiagente. El conjunto de los estados objetivos S^{PM*} coincide con los estados objetivos del rol instanciado: $S^{Serv:obtenerPrevisiónMet*}$. El conjunto de operaciones que el agente búsqueda de agentes P^{PM} es capaz de realizar está compuesto por las operaciones que proporcionan el rol instanciado $p^{Serv:obtenerPrevisiónMet}$ y la operación *solicitarServicio* que permite solicitar un servicio proporcionado por los agentes del tipo *BA, IU, SP, OG*.

$$PM = \langle \alpha^{PM}, \theta^{PM}, R^{PM}, \gamma^{PM}, \phi^{PM}, S^{PM}, S^{PM*}, p^{PM}, \\ Locate^{PM}, Percept^{PM}, ComposeR^{PM}, Compose\theta^{PM}, Decision^{PM} \rangle$$

$$R^{PM} = \{Serv: obtenerPrevisiónMet\}$$

$$\phi^{OG} = S^F \cup S^T \cup S^C$$

$$S^{PM} = S^{Serv:obtenerPrevisiónMet} \cup \{radiaciónSolar \in \mathbb{R}, \quad 3.57 \\ velocidadViento \in \mathbb{R}, humedadRelativa, \\ precipitaciónLluvia \in \mathbb{R}, id \in \mathbb{N}\}$$

$$S^{PM*} = S^{Serv:obtenerPrevisiónMet*}$$

$$p^{PM} = p^{Serv:obtenerPrevisiónMet} \cup \{solicitarServicio\}$$

3.3. Protocolos de interacción

Esta sección describe las relaciones externas que se dan entre las distintas clases de agentes. Para ello, se detallan las dos últimas tareas de la fase de diseño. En primer lugar la "Elección de relaciones" está orientada a identificar los tipos de relaciones de cooperación y competición entre cada par de clases de agentes. Y en segundo lugar, la tarea "Definición de protocolos de interacción" describe el intercambio de mensajes entre las clases de agentes.

Los protocolos de interacción están compuestos por agentes que pueden actuar bien como iniciador o bien como receptor. El iniciador de un protocolo de interacción es el agente que inicia o desencadena una solicitud o propuesta a un agente que actúa como receptor. El agente receptor es aquel que recibe solicitudes o propuestas de un agente iniciador.



Las operaciones definidas para cada uno de los agentes se pueden clasificar en función de si el agente actúa como iniciador o receptor. La nomenclatura elegida para cada una de las operaciones hace referencia sobre si el agente actúa como iniciador o receptor, de forma que las operaciones que satisfacen la expresión regular *responder* * indican que el agente actúa como receptor de las solicitudes recibidas.

Las relaciones que se pueden dar entre cada par de clases de agentes pueden ser de cooperación o de competición, en función de si ambos persiguen los mismos objetivos o entran en conflicto.

Independientemente de si la relación es de cooperación o competición, se pueden diseñar mediante diversos protocolos de interacción. Se ha utilizado como base el conjunto de protocolos de interacción definidos en (FIPA, 2002b), siendo los principales:

- Request: permite a un agente solicitar una acción a otro, que puede aceptar la solicitud o rechazarla.
- RequestWhen: añade al protocolo anterior una condición lógica, de forma que cuando se cumple la condición se solicita la acción.
- Propose: el agente iniciador propone al agente receptor que el agente iniciador puede realizar una acción.
- Contract-net: permite al agente iniciador solicitar una acción a un conjunto de agentes receptores, de forma que el agente iniciador es capaz de decidir en función de las respuestas de los receptores cuales serán los receptores que finalmente realizarán la acción.
- Contract-net iterated: versión iterativa del protocolo anterior.
- Brokering: Similar al protocolo contract-net que utiliza un agente intermediario que recibe la petición del agente iniciador y la distribuye entre el conjunto de agentes receptores, para finalmente enviar las respuestas al agente iniciador.
- Recruiting: Es una variante del protocolo brokering, en el que las respuestas de los agentes que reciben la solicitud de acción por parte del agente bróker, responden directamente al agente iniciador.
- Subscribe: permite a un agente suscribirse a otro agente para que le mantenga informado.
- EnglishAuction: permite obtener el precio de un bien en el mercado comenzado por un valor inferior al real e ir subiéndolo sucesivamente mediante un proceso de subasta.

- DutchAuction: Variante del anterior en el que el precio se fija inicialmente por encima del valor al real, que va disminuyendo conforme la subasta avanza.

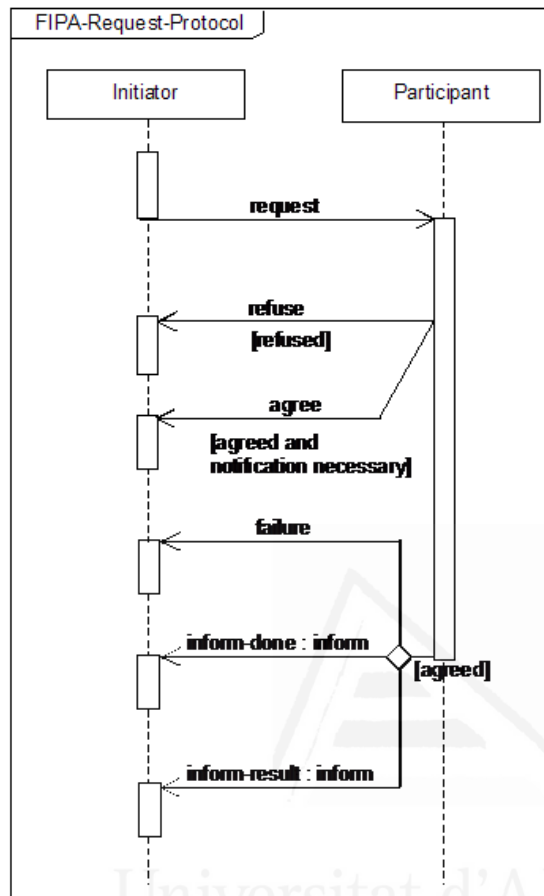


Figura 3.6. Diagrama de secuencia que muestra el protocolo de interacción request definido en (FIPA, 2002c)

Los protocolos de interacción con mayor repercusión son el protocolo request y contract net tanto en su versión sencilla como iterativa. La plantilla que contiene el conjunto de mensajes intercambiados entre el agente iniciador y receptor se pueden visualizar en la figura 3.6 y figura 3.7 respectivamente.

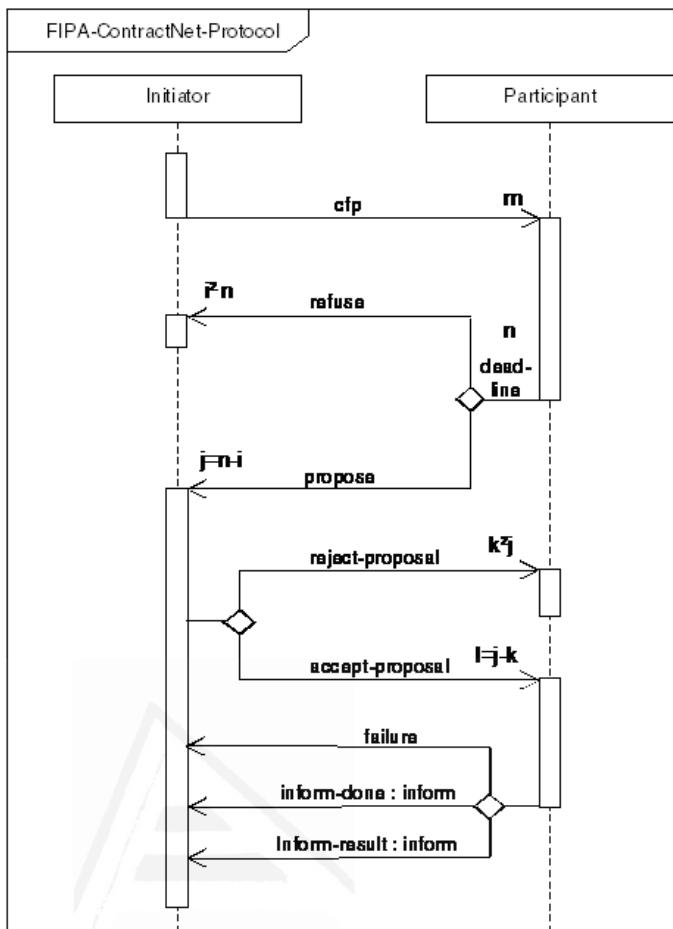


Figura 3.7. Diagrama de secuencia que muestra el protocolo de interacción contract-net definido en (FIPA, 2002a)

A continuación se muestra una tabla para cada clase de agente que recoge la información relativa a cada una de las operaciones en las que el agente actúa como iniciador, indicando si la relación es de cooperación o competición, el protocolo de interacción utilizado y la operación que recibe la solicitud del agente que actúa como receptor. El protocolo de interacción es implementado por cada una de las operaciones involucradas del agente iniciador y del agente receptor.



Operación	Tipo relación	Protocolo interacción	Clases agentes receptores	Operación
Solicitar Servicio (<i>S</i>)	Coop.	Request	<i>IU, OG, SP, PM</i> (rol <i>Serv:S</i>)	Responder Solicitud Servicio (<i>S</i>)
Solicitar Compra Potencia	Coop.	Propose	<i>T, C</i> (rol <i>Con</i>)	Responder Solicitud Compra
Solicitar Reducción Consumo	Comp.	Contract-net iterativo	<i>T, C</i> (rol <i>Con</i>)	Responder Solicitud Reducción Consumo
Solicitar Búsqueda Agente	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv: buscarAgente</i>)	Responder Solicitud Servicio (buscarAgente)
Solicitar Búsqueda Servicio	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv: buscarServicio</i>)	Responder Solicitud Servicio (buscarServicio)
Solicitar Registro	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv: registrar</i>)	Responder Solicitud Servicio (registrar)

Tabla 3.10. Interacciones iniciadas por la clase de agente *F*

Las interacciones iniciadas por las clase de agente *F* están resumidas en la tabla 3.10 donde se pueden ver tanto las operaciones definidas para dicha clase de agente y como las operaciones de los roles que implementa. La operación *solicitarServicio(S)* permite al agente solicitar el servicio (*S*) al agente receptor que implemente la operación *responderSolicitudServicio(S)* a través del rol *Serv:S*. La operación *SolicitarReducciónConsumo* utiliza el protocolo de interacción contract-net iterativo estableciendo una relación de competición entre las clases de



agentes receptoras de la solicitud. En cambio, el resto de operaciones establece relaciones de cooperación al solicitar la realización de una acción a un único agente receptor mediante el protocolo request. Las operaciones *solicitarBúsquedaAgente*, *solicitarBúsquedaServicio* y *solicitarRegistro* son llevadas a cabo por cada una de las instancias del rol *Serv* que implementan sus respectivos servicios *Serv:buscarAgente*, *Serv:buscarServicio* y *Serv:registrar*. Dichas operaciones son implementadas por las clases de agentes *C* y *T*.

Operación	Tipo relación	Protocolo interacción	Clases agentes receptores	Operación
Solicitar Servicio (S)	Coop.	Request	<i>IU, OG, SP, PM</i> (rol <i>Serv:S</i>)	Responder Solicitud Servicio (S)
Solicitar Potencia	Comp.	Contract-net iterativo	<i>F, T</i> (rol <i>Prod</i>)	Responder Solicitud Consumo
Solicitar Búsqueda Agente	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv: buscarAgente</i>)	Responder Solicitud Servicio (buscarAgente)
Solicitar búsqueda Servicio	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv: buscarServicio</i>)	Responder Solicitud Servicio (buscarServicio)
Solicitar Registro	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv: registrar</i>)	Responder Solicitud Servicio (registrar)

Tabla 3.11. Interacciones iniciadas por la clase de agente *C*

Las interacciones iniciadas por la clase de agente *C* se muestran en la tabla 3.11 donde se pueden ver las operaciones definidas para dicha clase de agente y las operaciones de los roles que implementa. La operación *solicitarServicio(S)*, al igual que en el caso anterior permite al agente solicitar el servicio (*S*) al agente receptor que implemente la operación *responderSolicitudServicio(S)* a través del



rol *Serv:S*. La operación *SolicitarPotencia* utiliza el protocolo de interacción contract-net iterativo estableciendo una relación de competición entre las clases de agentes receptoras de la solicitud. El resto de operaciones establece relaciones de cooperación al solicitar una acción mediante el protocolo request.

Operación	Tipo relación	Protocolo interacción	Clases agentes receptores	Operación
Solicitar Servicio (S)	Coop.	Request	<i>IU, OG, SP, PM</i> (rol <i>Serv:S</i>)	Responder Solicitud Servicio (S)
Solicitar Compra Potencia	Coop.	Propose	<i>T, C</i> (rol <i>Con</i>)	Responder Solicitud Compra
Solicitar Reducción Consumo	Comp.	Contract-net iterativo	<i>T, C</i> (rol <i>Con</i>)	Responder Solicitud Reducción Consumo
Solicitar Potencia	Comp.	Contract-net iterativo	<i>F, T</i> (rol <i>Prod</i>)	Responder Solicitud Consumo
Solicitar Búsqueda Agente	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv: buscarAgente</i>)	Responder Solicitud Servicio (buscarAgente)
Solicitar Búsqueda Servicio	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv: buscarServicio</i>)	Responder Solicitud Servicio (buscarServicio)
Solicitar Registro	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv: registrar</i>)	Responder Solicitud Servicio (registrar)

Tabla 3.12. Interacciones iniciadas por la clase de agente T



Las interacciones iniciadas por las clase de agente *T* se muestran en la tabla 3.12 donde se pueden ver tanto las operaciones definidas para dicha clase de agente y como las operaciones de los roles que implementa. Debido a que la clase de agente *T* puede ser considerada como la unión de las clases *F* y *C*, ya que implementa los roles *Prod* y *Con*, las particularidades de las interacciones iniciadas por la clase de agente *T* son similares a las definidas en la tabla 3.10 y tabla 3.11.

Las interacciones iniciadas por las clases de agentes *BA, IU, OG, SP* y *PM* se pueden observar en la tabla 3.13. A pesar de que cada uno de las clases de agentes implemente diferentes instancias del rol *Serv* para cada uno de los servicios que ofrece cada clase de agente, las operaciones que inician la interacción se resumen en *SolicitarServicio(S)* donde (*S*) es el parámetro que contiene el servicio a solicitar de la clase de agente receptora.

Operación	Tipo relación	Protocolo interacción	Clases agentes receptores	Operación
Solicitar Servicio (<i>S</i>)	Coop.	Request	<i>IU, BA, OG, SP, PM</i> (rol <i>Serv</i> : <i>S</i>)	Responder Solicitud Servicio (<i>S</i>)
Solicitar Registro	Coop.	Request	<i>BA</i> (rol <i>Serv</i> : <i>registrar</i>)	Responder Solicitud Servicio (registrar)

Tabla 3.13. Interacciones iniciadas por las clases de agentes *BA, IU, OG, SP* y *PM*



Referencias

- (Bratman, 1987) Bratman, M. (1987) *Intention, Plans, and Practical Reason*, Harvard University Press.
- (Cohen and Levesque, 1990) Cohen, P. R. and Levesque, H. J. (1990) Intention is choice with commitment. *Artificial Intelligence*, 42, 213-261.
- (Chen, 1976) Chen, P. (1976) The entity relationship model -- toward a unified view of data. *ACM Trans. Database Syst.*, 1, 9-36.
- (Ferber and Müller, 1996) Ferber, J. and Müller, J. P. (1996) Influences and Reaction: a Model of Situated Multiagent Systems. *Proceedings of the 2th Conference on Multi-agent Systems*. Japan, AAAI Press.
- (FIPA, 2002a) FIPA (2002a) FIPA Contract-Nett Interaction Protocol Specification <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/index.html> Last access on 26/04/2012.
- (FIPA, 2002b) FIPA (2002b) FIPA Interaction Protocol Specification <http://www.fipa.org/repository/ips.php3> Last access on 26/04/2012.
- (FIPA, 2002c) FIPA (2002c) FIPA Request Interaction Protocol Specification <http://www.fipa.org/specs/fipa00026/index.html> Last access on 26/04/2012.



- (Genesereth and Nilsson, 1987) Genesereth, M. R. and Nilsson, N. J. (1987) Logical foundations of artificial intelligence, Morgan Kaufmann Publishers Inc. . 0-934613-31-1.
- (Georgeff et al., 1999) Georgeff, M., Pell, B., Pollack, M., Tambe, M., Wooldridge, M., Müller, J., Rao, A. and Singh, M. (1999) The Belief-Desire-Intention Model of Agency Intelligent Agents V: Agents Theories, Architectures, and Languages. Springer Berlin / Heidelberg.
- (Maciá, 2001) Maciá, F. (2001) Modelos de Administración de Redes Heterogéneas de Computadores. Sistema de Regeneración de Nodos de Red. *Tecnología Informática y Computación*. Alicante, Universidad de Alicante.
- (Omicini et al., 2008) Omicini, A., Ricci, A. and Viroli, M. (2008) Artifacts in the A&A meta-model for multi-agent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 17, 432-456.
- (Rao and Georgeff, 1991) Rao, A. S. and Georgeff, M. P. (1991) Modeling rational agents within a BDI-architecture. IN Allen, J., Fikes, R. and Sandewall, E. (Eds.) *Readings in agents*. Morgan Kaufmann.
- (Ricci et al., 2010) Ricci, A., Viroli, M., Piunti, M., Braubach, L., Briot, J.-P. and Thangarajah, J. (2010) Formalising the Environment in MAS Programming: A Formal Model for Artifact-Based Environments. *Programming Multi-Agent Systems*. Springer Berlin / Heidelberg.
- (Ruiz, 2003) Ruiz, D. (2003) Modelo de Regulación Desatendida de Sistemas Biológicos. Caracterización y Corrección de Disfunciones Neurógenas Urinarias en Humanos. *Tecnología Informática y Computación*. Alicante, Universidad de Alicante.
- (Soriano, 2001) Soriano, A. (2001) Modelado y Simulación del Regulador Neuronal del Tracto Urinario Inferior. *Tecnología Informática y Computación*. Alicante, Universidad de Alicante.



(Weyns and Holvoet, 2004) Weyns, D. and Holvoet, T. (2004) A Formal Model for Situated Multi-Agent Systems. *Fundam. Inf.*, 63, 125-158.

(Wooldridge and Jennings, 1995) Wooldridge, M. and Jennings, N. (1995) Agent theories, architectures, and languages: A survey *Intelligent Agents*. Springer Berlin / Heidelberg.

(Zeng et al., 2009) Zeng, J., Liu, J. F., Ngan, H. W. and Wu, J. (2009) A multi-agent solution to energy management of distributed hybrid renewable energy generated system. *Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009)*, 8th International Conference on.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

4

Capítulo cuatro

Gestión de la Distribución Eléctrica

El capítulo detalla la gestión de la distribución eléctrica en base al modelo de sistema multiagente definido en el capítulo anterior. La obtención de la distribución óptima se descompone en las fases de optimización local y global. La primera, totalmente distribuida, describe el intercambio de mensajes dando lugar al conjunto de interacciones que permiten elegir a los mejores agentes para proporcionar suministro eléctrico y el conjunto de interacciones que permiten solicitar que se reduzca el consumo ante potenciales situaciones críticas. Por su parte, la fase de optimización global, que es centralizada, a partir de la solución anterior busca caminos alternativos durante un tiempo determinado, considerando el sistema completo para mejorar la bondad de la solución previa.



1. Introducción

Las clases de agentes descritas en el capítulo anterior están dotadas de un repertorio de operaciones que actúan sobre los atributos modificando su estado. Dichas acciones están guiadas en primera instancia por los propios estados objetivos y en segunda, por los relativos a cada uno de los roles implementados, determinando, de esta forma, la distribución eléctrica entre el conjunto de agentes que representan la red eléctrica a gestionar.

La gestión de la distribución de energía eléctrica se puede concebir desde diferentes puntos de vista en función del enfoque con el que se analice el sistema. Desde el punto de vista económico, la gestión de la distribución eléctrica se puede definir como el conjunto de los procesos de compra-venta de energía eléctrica que por un lado permiten a los productores maximizar sus ingresos económicos y a los consumidores minimizar el coste económico de la energía requerida. Este enfoque centra la importancia en los beneficios económicos, y en menor medida en la satisfacción del usuario, restricciones eléctricas y respeto medioambiental. La satisfacción del usuario es relevante debido a que la energía es comprada con la condición de que el usuario considere beneficiosa la diferencia entre el valor de servicio proporcionado y el del coste de la energía. Las restricciones eléctricas y el respeto medioambiental son consideradas de forma indirecta, debido a que es conveniente tenerlas en cuenta a la hora de proporcionar calidad de servicio.

Desde el prisma eléctrico la gestión de la distribución eléctrica en mayor medida consiste en determinar los caminos óptimos por los cuales se va a transportar la electricidad desde los productores hasta los centros de consumo, teniendo en cuenta restricciones eléctricas, minimizando las pérdidas eléctricas derivadas del transporte, evitando situaciones de congestión y garantizando la calidad del servicio, proporcionando tanto la tensión como la corriente requerida en los destinatarios finales. Este enfoque centra su atención en las restricciones eléctricas y en menor medida en la satisfacción del usuario y aspectos económicos. Desde el punto de vista económico, es de vital importancia que la distribución eléctrica sea económicamente rentable, relajando la importancia de los aspectos relacionados con las restricciones eléctricas, la satisfacción de los usuarios y en mayor medida el respeto medioambiental. El aspecto medioambiental se considera de forma indirecta al tener en cuenta las predicciones de producción energética de las fuentes de energía renovables.



El tercer punto de vista, propuesto en este capítulo, tiende a ser equilibrado considerando factores económicos, eléctricos y que, además, potencia otros factores como pueden ser medioambientales y la satisfacción del usuario. Se trata, por tanto, de adecuar los requerimientos energéticos de los centros de consumo a la energía disponible de los productores en función de la naturaleza económica e impacto medioambiental, de las restricciones eléctricas y de la capacidad de reducción de consumo sin afectar considerablemente la satisfacción de los destinatarios finales. La figura 4.1 refleja la importancia de los aspectos más relevantes de la distribución eléctrica para cada uno de los enfoques descritos.

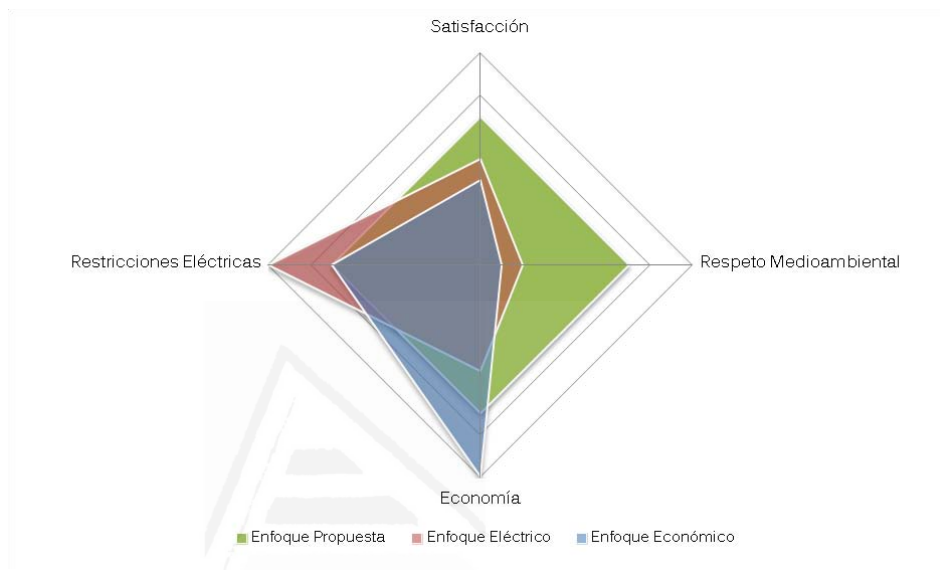


Figura 4.1. Importancia de los aspectos que intervienen en la distribución eléctrica para cada uno de los enfoques

El método propuesto pretende considerar los aspectos anteriores de forma equilibrada, aunque dicho equilibrio se pueda modificar en función del problema a solucionar, y para ello la gestión de la distribución de energía eléctrica es concebida en base a dos fases. La fase de optimización local se encarga de obtener una solución que únicamente tiene en cuenta a los k -agentes vecinos, es decir, los que se encuentran conectados a una distancia menor o igual que k . Por su parte, la segunda se denomina fase de optimización global y es llevada a cabo por un agente perteneciente a la clase de optimización global $\alpha_i \in OG$. Tiene un carácter opcional, ya que únicamente es ejecutada cuando se requiere refinar la solución obtenida durante la fase anterior y existen recursos computacionales y



temporales suficientes, ya que tiene en cuenta todos los agentes que componen la red. Las fases que componen la gestión de la distribución eléctrica se muestra en la figura 4.2, donde se aprecia el estado inicial de los agentes $fa_x \in F$, $ta_y \in T$ y $ca_z \in C$ que representan a los dispositivos que utilizan potencia eléctrica, la solución optimizada localmente obtenida durante la fase de optimización local y el agente $oga_1 \in OG$ que en el caso de ser necesario es capaz de refinar la solución anterior con el fin de obtener una solución cercana a la óptima.

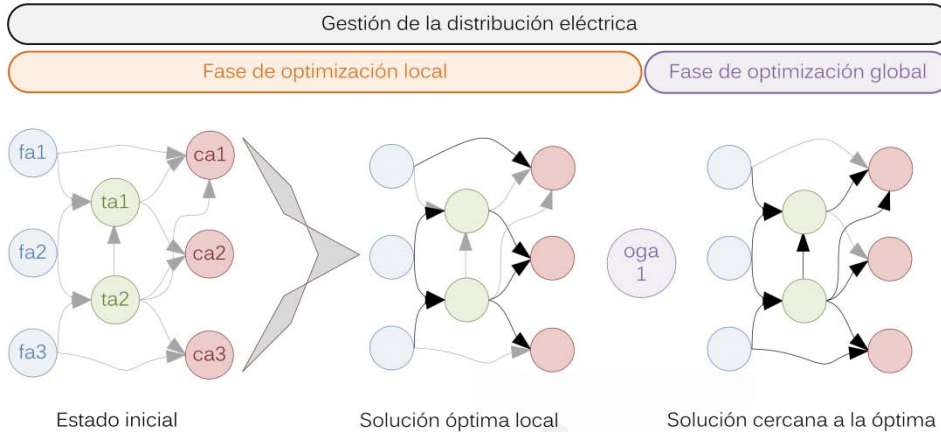


Figura 4.2. Vista general de la gestión de la distribución de energía eléctrica compuesta por dos fases

La distribución energética se obtiene en función de un periodo de tiempo concreto (por ejemplo cada hora), de esta forma la planificación obtenida es válida durante dicho intervalo de tiempo hasta obtener la nueva planificación para el siguiente periodo. El valor concreto del periodo depende de la naturaleza, tamaño y entropía de la red, entendiendo entropía como la evolución, dinamismo o variabilidad de los requerimientos energéticos.

Al comienzo de cada periodo los agentes que implementan el rol *Prod* y *Con* solicitan al agente de búsqueda, en este caso $ba_1 \in BA$, cuales son los agentes vecinos que se encuentran a una distancia menor o igual que el parámetro k . El mensaje *buscarVecinos(k)*, para facilitar la comprensión de la figura 4.3, agrupa los correspondientes mensajes *solicitarBúsquedaAgente* y *solicitarBúsquedaServicio* que han sido definidos para las clases de agentes F , T y C , ya que el mensaje *buscarVecinos* no se ha definido como una operación primitiva de dichas clases de agentes. De forma paralela, el agente $spa_1 \in SP$, se encarga de solicitar al agente $pma_1 \in PM$ la predicción meteorológica a través de la operación



obtenerPrevisiónMet(periodo) para un periodo de tiempo determinado. Una vez obtenidos los datos meteorológicos, el agente *pma1* simula los datos tanto de consumo como de generación energética para cada uno de los agentes que implementan los roles *Prod* y *Con*. Seguidamente, envía dichos datos a sus respectivos agentes para que tenga lugar la fase de optimización local. Aunque en este ejemplo únicamente existe una instancia de las clases de agentes *PM* y *SP*, en escenarios dotados de un mayor número de agentes con el fin de evitar cuellos de botella, se pueden definir varias instancias de dichos agentes, por ejemplo una instancia por cada región δ_i definida en el entorno E .

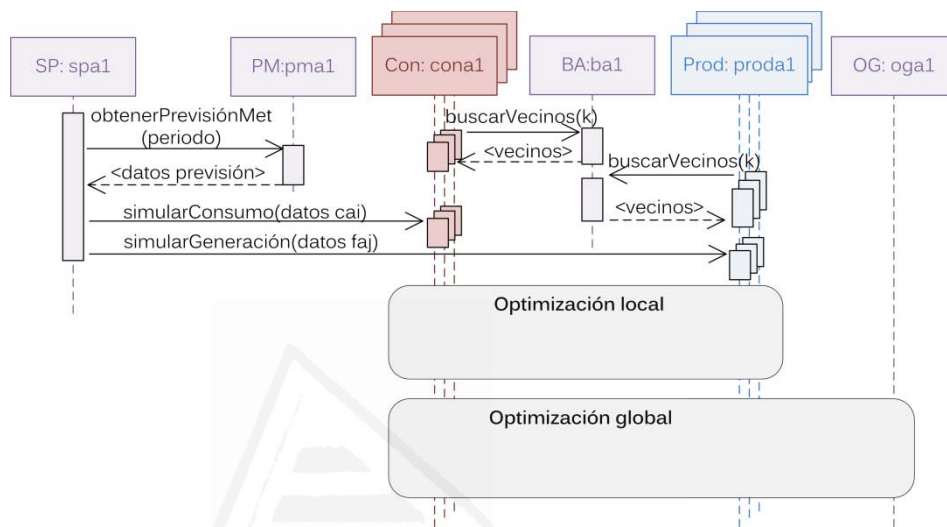


Figura 4.3. Diagrama de secuencia que ofrece una visión general del intercambio de mensajes entre las distintas clases de agentes en cada periodo

La figura 4.3 muestra el diagrama de interacción, concretamente el de secuencia, (FIPA, 2002) que está basado en la notación AUML (Odell et al., 2000). En dicha figura se aprecian los mensajes intercambiados entre las clases de agentes involucrados. Las fases de optimización local y global se muestran como una caja negra que será detallada en las siguientes secciones. Las entidades que aparecen en el diagrama como *Con:cona1* y *Prod:proda1* hacen alusión a los agentes que implementan los roles *Con* y *Prod* respectivamente. Para facilitar la comprensión se denomina agente *Prod* al conjunto de agentes que implementan el rol *Prod*, de forma que $Prod = F \cup T$. Análogamente, se denomina agente *Con* al conjunto de agentes que implementan el rol *Con*, resultando que $Con = T \cup C$.



2. Fase de optimización local

La fase de optimización local es la que tiene mayor importancia debido a que su naturaleza distribuida permite obtener soluciones aceptables, independientemente del tamaño del problema a resolver. Está basada en las interacciones entre agentes, de forma que cada uno de los agentes, en función de su estado inicial y de sus objetivos, desencadenan las acciones pertinentes del conjunto de operaciones definido para cada clase, interactuando con los agentes vecinos que se encuentran a una distancia menor o igual que el parámetro k . La figura 4.4 ilustra cuales son los posibles conjuntos de agentes vecinos del agente $ca2 \in C$ en función del valor del parámetro k , en una hipotética red de distribución con una topología de malla.

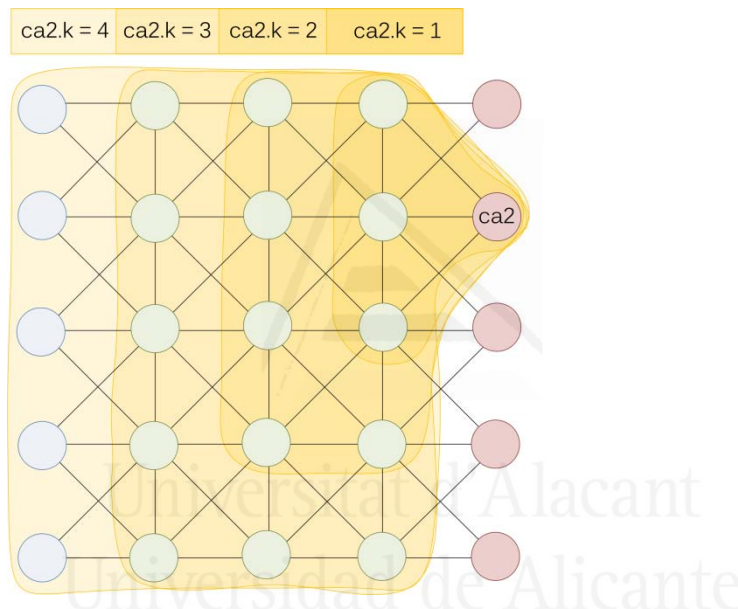


Figura 4.4. Conjuntos de agentes vecinos del agente $ca2$ en función del atributo k

Una estrategia alternativa o incluso complementaria a la utilización de los k agentes consiste en que cada agente de clase T actualice el valor de sus propios parámetros, que indican la idoneidad de cada uno, en función del producto de la potencia suministrada de sus respectivos agentes de tipo $Prod$ por el valor de sus correspondientes parámetros. De esta forma se consigue que cada agente refleje

las características de los agentes de los que obtiene el suministro eléctrico de forma recursiva hasta alcanzar a los agentes de tipo F . La definición 4.1 muestra como se actualiza el valor del parámetro *toxicidad* de cualquier agente $tax \in T$, para el siguiente periodo de tiempo $t + 1$ en función de la energía proporcionada anteriormente. $Prod_i$ hace alusión a los n agentes que implementan el rol *Prod* directamente conectados que son capaces de proporcionar suministro eléctrico.

$$tax.toxicidad_{t+1} = \frac{\sum_{i=0}^n ((Prod_i.potenciaSalida_t / Prod_i.potenciaNom) * Prod_i.toxicidad_t)}{n} : Prod_i \in tax \wedge tax \in T \quad 4.1$$

La elección de la estrategia de los k agentes vecinos o la de actualizar los valores de los parámetros de cada agente en función de sus respectivos proveedores. Tal y como se detalla en el siguiente capítulo se ha implementado la estrategia que utiliza a los k agentes vecinos.

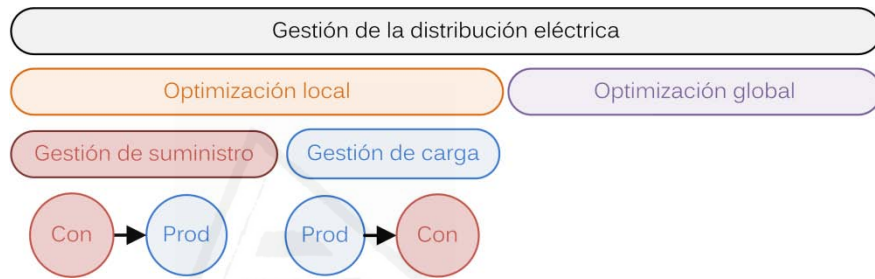


Figura 4.5. Organización del conjunto de interacciones que componen la fase de optimización local

La fase de optimización local está compuesta por dos grupos de interacciones o políticas enfocadas a la gestión de suministro y gestión de carga (Gellings and Chamberlin, 1987). La gestión de suministro tiene el cometido de adaptar el suministro energético a las necesidades energéticas. Así se genera y distribuye la potencia eléctrica necesaria para abastecer los requerimientos energéticos. Esto repercute en tener que sobredimensionar la capacidad de generación para poder abastecer en momentos de mayor demanda (Strbac, 2008). En cambio, la gestión de carga presenta el enfoque contrario, adaptando los requerimientos energéticos a la potencia disponible. La gestión de carga al modificar el comportamiento de los dispositivos para disminuir su consumo puede repercutir de forma negativa en la satisfacción de los usuarios. Por este motivo,



únicamente se utiliza en situaciones en las que es conveniente ahorrar energía. La gestión de carga permite realizar un reparto más racional y equitativo adaptando los requerimientos energéticos, reduciendo el consumo energético no esencial, a la energía disponible. La figura 4.5 ilustra la organización de la fase de optimización local, indicando que los agentes *Con* son los encargados de iniciar las políticas de gestión de suministro y los agentes *Prod* las de gestión de carga.

2.1. Gestión de suministro

Constituye el primer conjunto de interacciones que componen la fase de optimización local. El cometido de estas interacciones es establecer una primera distribución de la energía disponible de los agentes *Prod* entre los agentes que presentan requerimientos energéticos, *Con*.

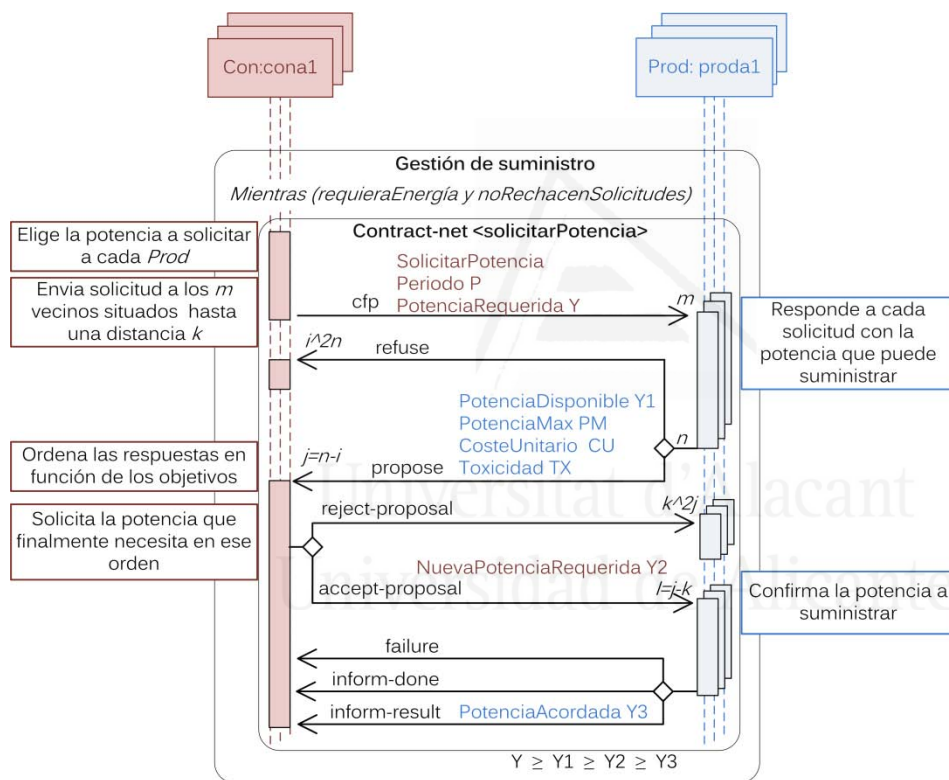


Figura 4.6 Diagrama de secuencia, complementado con las acciones que determinan los mensajes a enviar, que describe la negociación para distribuir la energía disponible



La distribución energética obtenida como consecuencia de dichas interacciones presenta las siguientes características. Todos los agentes de tipo *Con* envían sus peticiones de forma asíncrona a los potenciales suministradores, agentes *Prod*, que se encuentran a una distancia menor o igual a k . Cada agente *Prod* asigna inicialmente la energía disponible por orden de recepción de las solicitudes de potencia, debido a que las solicitudes, aunque están acotadas para un periodo de tiempo, son asíncronas. En este instante todos los agentes solicitantes tienen la misma prioridad y sus peticiones se resuelven mediante una cola por orden de llegada. El agente *Con*, que previamente ha realizado la solicitud, es quien determina cuáles son los mejores agentes candidatos a proporcionar la potencia requerida. La elección de los mejores agentes se realiza en función de la información, enviada por cada agente *Prod* vecino, relativa al coste económico, respecto medioambiental y capacidad de generación.

Las solicitudes de energía son realizadas mediante el protocolo contract-net de forma iterativa, hasta que el agente solicitante *Con* haya obtenido toda la energía requerida o todas las solicitudes hayan sido rechazadas. El agente *Con* a la hora de decidir cuanta potencia solicita a cada uno de los posibles suministradores tiene varias alternativas: solicitar toda la potencia que necesita a cada uno de ellos o solicitar a cada uno de ellos la cantidad proporcional al número de posibles suministradores. La elección de una política u otra es controlada por el atributo *tipoSolicitud* del rol *Con*. Una vez determinada la potencia a solicitar, Y , a cada uno de los m agentes *Prod* vecinos, envía un mensaje de tipo call for proposal, *cfp*, solicitando dicha potencia para ser suministrada durante el periodo de tiempo, P . El agente *Prod* al recibir las solicitudes evalúa su estado interno y responde o bien rechazando la solicitud o bien con la potencia que es capaz de suministrar $Y1$; la potencia máxima PM ; el coste económico por unidad CU ; y la repercusión medioambiental derivada del proceso de generación TX . Cabe mencionar que la potencia $Y1$ que cada agente *Prod* es capaz de suministrar es menor o igual que la potencia demandada Y por el agente *Con*. Mientras tanto, el agente *Con* espera durante un tiempo determinado o hasta recibir la contestación de los m agentes *Prod* a los que había enviado la solicitud previamente. Una vez que ha recibido las contestaciones dentro del tiempo de espera, compara las ofertas realizadas por dichos agentes *Prod*, para elegir aquellas que permiten satisfacer sus propios objetivos definidos en S^{Con*} . Debido a que el agente puede tener varios objetivos distintos, el atributo *criterioElecciónProd* permite elegir el objetivo específico a satisfacer $s^{Con*} \in S^{Con*}$.



Posteriormente, *Con* ordena las respuestas en función de la afinidad al objetivo y va respondiendo en ese orden a cada uno hasta cubrir sus necesidades energéticas o agotar la lista de candidatos. En este mensaje solicita una cantidad de potencia $Y2$, que puede ser distinta tanto de $Y1$ como de Y , con la restricción de que ha de ser menor o igual que $Y1$. Cuando los agentes *Prod* reciben su correspondiente mensaje *NuevaPotenciaRequerida* $Y2$, en el caso de que todo vaya bien, informan al agente *Con* mediante un mensaje de tipo *inform* de que la potencia $Y2$ se ha podido reservar satisfactoriamente o si por el contrario no se ha podido realizar. Una vez alcanzado este punto con todos los agentes *Prod*, si la condición de finalización del bucle sigue vigente, comienza de nuevo el protocolo de interacción contract-net descrito. Las interacciones y la toma de decisiones por parte de los agentes involucrados se encuentran descritas en la figura 4.6.

Durante el proceso de negociación la potencia requerida inicialmente Y por el agente *Con* a los m agentes *Prod* difiere de la que finalmente es reserva para ser suministrada $Y2$ por cada uno de ellos. Esto se debe a que en primer lugar si el productor no puede suministrar por completo la potencia Y , contesta con la potencia que es capaz de generar $Y1$. Además, la potencia solicitada $Y2$ finalmente puede diferir de $Y1$, si en el mensaje había solicitado toda la potencia requerida a cada agente *Prod* y el resto de agentes durante el proceso de negociación le han confirmado una potencia menor que Y , entonces cuando va a responder necesita una cantidad menor de la solicitada inicialmente Y y de la que le habían respondido que le podían suministrar $Y1$.

2.2. Gestión de carga

Las políticas de gestión de carga, al adaptar el consumo energético de los agentes *Con* a la energía disponible de los agentes *Prod*, presentan las siguientes ventajas recogidas en (Strbac, 2008): reduce la diferencia entre la capacidad de generación y la demanda máxima del sistema; mejora la eficiencia de las inversiones en las redes de transporte y distribución ya que actualmente se utilizan mecanismos de seguridad preventivos evitando potenciales situaciones insostenibles y de congestión; mantiene el equilibrio entre demanda-generación en sistemas con fuentes de energía renovables no controlables de forma directa; y permite equilibrar la demanda y la generación en sistemas eléctricos distribuidos.



Las políticas de gestión de carga se aplican en la fase de optimización local, concretamente después de las políticas de gestión de suministro. Presentan el cometido de maximizar el aprovechamiento de la energía disponible cuando no hay suficiente energía para todos, por lo que solamente se ejecutan ante determinadas situaciones, evitando disminuir la satisfacción del usuario. Estas situaciones se dan ante algunas de las siguientes condiciones: el estado de los agentes *Prod* alcanza un nivel crítico, se prevé que no habrá suficiente potencia en el futuro o la potencia solicitada durante dicho periodo es superior a la media de las solicitudes previas. Las condiciones para que se lleven a cabo las políticas de gestión de carga están parametrizadas por lo que pueden ser más o menos restrictivas en función del problema a resolver. Asimismo, cada agente *Prod* a través del valor del atributo *condGestiónCarga* se especifica cuál es la condición a tener en cuenta o si se han de considerar cualquiera de ellas. Por lo tanto, si se dan las condiciones oportunas se desencadenan los protocolos de negociación para que los agentes que habían demandado potencia eléctrica reduzcan sus requerimientos energéticos, siempre que sea posible, y así poder redistribuir o almacenar la energía que previamente habían acordado suministrar.

Al igual que ocurre en la gestión de suministro, las interacciones que se producen en la gestión de carga se basan en iteraciones del protocolo contract-net. El protocolo puede ser iniciado por cualquiera de los agentes de tipo *Prod*, que hayan intervenido en la gestión de suministro. Para ello, cada agente *Prod* evalúa su estado teniendo en cuenta el criterio especificado en el atributo *condGestiónCarga*. Si el agente decide que ha de ahorrar energía entonces envía un mensaje *SolicitudReducciónConsumo* de tipo *cfp* indicando el periodo de tiempo *T* a cada uno de los *m* agentes *Con* que previamente habían acordado comprar energía durante el periodo de tiempo especificado. Cuando algún agente *Con* recibe una o varias peticiones *SolicitudReducciónConsumo* entonces comprueba los datos relativos a la simulación de consumo que recibieron del agente *SP* antes de comenzar la fase de optimización local. Comprueba la importancia de los modos de funcionamiento, que se quieren ejecutar durante dicho periodo, utilizando la tupla *modosFunc*, ya que contiene la importancia *Funcionalidad.importancia* y el consumo requerido *Funcionalidad.potReq*. De esta forma, se determinan los modos de funcionamiento que pueden ser modificados para reducir el consumo energético. Seguidamente, si no ha encontrado ningún modo que pueda ser desactivado, rechaza la solicitud. En caso contrario responde con el mensaje *ReduccionesPosibles Y1 Y2, ..., Yp* que contiene una lista de reducciones posibles de



cada uno de los modos de funcionamiento a modificar. El agente *Prod* al recibir todas las respuestas de cada uno de los agentes que son capaces de reducir el consumo, determina mediante el atributo *políticaReducción* si conviene solicitar a todos los agentes que hayan respondido que reduzcan ligeramente la potencia solicitada o si por el contrario se solicita al mínimo número de agentes que reduzcan considerablemente su consumo. Acto seguido, el agente *Prod* envía el respectivo mensaje a cada destinatario *ConfirmarReducción Y2 Y3* con la lista de consumos asociados a cada modo de funcionamiento que debe modificar.

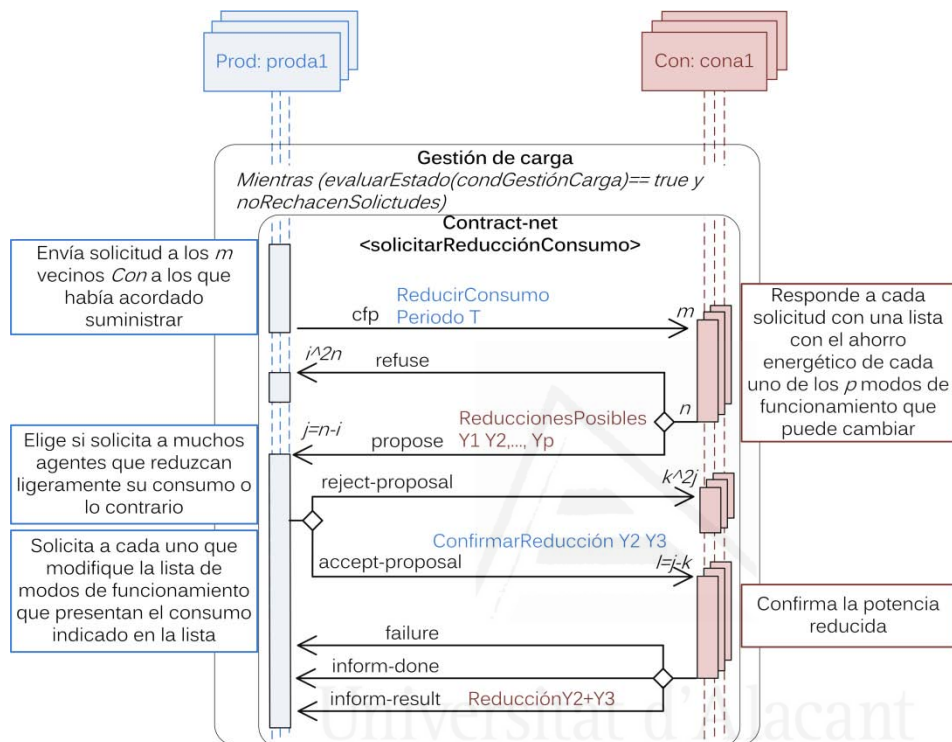


Figura 4.7. Diagrama de secuencia, complementado con las acciones que determinan los mensajes a enviar, que describe la gestión de carga

Una vez que cada agente *Con* recibe dichos mensajes, si es posible realizar la petición, responde informando con la potencia que ha podido prescindir mediante el mensaje *Reducción Y2 + Y3*. En el caso de que el agente *Prod* haya terminado de interactuar con los *m* agentes *Con*, y considera que todavía es necesario continuar ahorrando energía, y además, las respuestas anteriores no han sido rechazadas, entonces vuelve a comenzar el protocolo contract-net, continuando así hasta que



no necesite ahorrar más energía o todas las solicitudes sean rechazadas. Todas estas interacciones y la toma de decisiones están representadas mediante el diagrama de secuencia de la figura 4.7.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



3. Fase de optimización global

El estado de cada uno de los agentes de tipo *Prod* o *Con* contiene información sobre la distribución de potencia eléctrica para el periodo de tiempo planificado, por lo que una vez concluida la fase de optimización local y consecuentemente las interacciones destinadas a la gestión de suministro y de carga, se obtiene una posible solución, que ha sido denominada “solución óptima local” en la figura 4.2. Dicha solución presenta la distribución óptima de potencia de acuerdo a los objetivos individuales de cada agente, aunque el epíteto local hace referencia a que la solución está optimizada de forma local entre los agentes vecinos ubicados a una distancia menor o igual al atributo definido para cada agente k .

La fase de optimización global es llevada a cabo por el agente perteneciente a la clase *OG*, que recibe el estado de cada uno de los agentes pertenecientes a *F*, *T* y *C*, ya que al finalizar las interacciones de sus respectivas fases de optimización local informan de su estado al agente $oga1 \in OG$. Una vez que el agente $oga1$ ha recibido el estado de todos los agentes, en función del número de agentes que compongan el sistema, tiempo disponible y recursos computacionales, se desencadena el algoritmo de refinamiento progresivo de la solución óptima local.

$$\begin{aligned}
 \text{bondad} = & (Norm(\sum_{i=0}^n A_i \cdot \text{potenciaSalida} / A_i \cdot \text{potenciaNom} * \\
 & A_i \cdot \text{toxicidad}) * \text{ecológico} \cdot \text{factorPonderación} / 100 + \\
 & Norm(\sum_{i=0}^n A_i \cdot \text{potenciaSalida} / A_i \cdot \text{potenciaNom} * \\
 & A_i \cdot \text{precioUnitVenta}) * \text{económico} \cdot \text{factorPonderación} / 100 + \\
 & Norm(\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m C_i \cdot \text{ModosFunc}_j \cdot \text{importancia}) * \\
 & \text{satisfacción} \cdot \text{factorPonderación} / 100
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

$A_i \in Prod \in A, \quad C_i \in C$

En primer lugar calcula la bondad de la distribución, $\text{bondad} \in \mathbb{R}$ a partir del atributo *critérioOptimización*. El atributo *critérioOptimización* \in *Criterio* contiene el factor de ponderación o relevancia de los criterios: ecológico, económico y satisfacción, por lo que el valor de bondad se obtiene como una suma ponderada de los tres criterios normalizados. La normalización de cada criterio otorga valores



entre 0 y 1, por lo que la bondad de la solución está entre 0 y 3. Tal y como se muestra en la definición 4.2.

Una vez calculada la bondad de la solución inicial, se trata de buscar soluciones alternativas que mejoren dicha bondad inicial. Para ello, se aprovecha parte de la información obtenida durante el cálculo de la bondad, para identificar los agentes de tipo T , que hacen de intermediarios, que mayor penalización aportan a dicha bondad. Se comienza por el agente que mayor penalización aporta y se calculan rutas alternativas para redirigir la potencia eléctrica que fluye a través de ese agente cuyo agente origen y destino no pertenecen a su conjunto de agentes vecinos. No se pretende redirigir toda la potencia que fluye por dicho agente, sino aquella que procede o va dirigida a un agente externo al conjunto de agentes vecinos. La potencia que procede y es consumida dentro del conjunto de agentes vecinos no es necesario redirigirla, ya que al haber sido distribuida en la fase de optimización local, dicha solución no es susceptible de mejora, por lo que únicamente hay que redirigir aquella que pasa por allí de forma indirecta. Una vez que se ha redirigido la potencia indirecta, se ajusta el resto de la red, para que los requerimientos de consumo y generación sean coherentes. Finalmente, se calcula la bondad de la nueva solución. En el caso de que la bondad sea peor que la original se desecha, en caso contrario se almacena la nueva solución y se vuelve a repetir el proceso hasta que no se obtengan soluciones mejores o se agote el tiempo estimado de cómputo. El pseudocódigo 4.1 muestra la función *optimizar* que se encarga de buscar una solución alternativa que mejore significativamente la solución pasada como parámetro conforme se ha descrito anteriormente mientras haya tiempo disponible.

La llamada a la función *redistribuir*, cuya definición se muestra en pseudocódigo 4.2, se encarga de buscar caminos alternativos para redistribuir la potencia indirecta, *potIndirecta* que fluye a través del agente *aPenal*, que es suministrada por el agente *aOrigen* y que es requerida por el agente *aDestino*. Dicha función es recursiva y se basa en la estrategia de resolución de problemas ramificación y poda. Para ello, explora un subconjunto representativo de todas las posibles soluciones, no todas, y evitando explorar una rama de soluciones que empeoran la mejor solución obtenida hasta ese instante. La complejidad de cómputo es importante en este punto, por lo que no se exploran todas las posibles soluciones, si no que se establece un conjunto representativo de posibles soluciones. El conjunto representativo se establece mediante combinaciones de fracciones de la *potIndirecta*. Dichas fracciones dependen del número de



posibles agentes alternativos por los que se puede redistribuir. En los casos en que haya menos de 5 agentes alternativos, la potencia indirecta a distribuir se fracciona en 1/5 parte como base de las combinaciones junto con el resto. Esto evita posibles situaciones con un número reducido de agentes alternativos, por ejemplo 2, ya que solamente se evaluarían las combinaciones $(x,0)(0,x),(x/2,x/2)$, siendo x la potencia indirecta a redistribuir. De esta forma se establecen distintas combinaciones para cada agente. Esta información se almacena en una matriz, llamada *matrizRedist*, donde las columnas representan a cada uno de los agentes alternativos y las filas las posibles combinaciones de potencia a distribuir por cada agente. Entonces para cada posible distribución (filas), se comprueba cómo afecta la aportación de cada agente a la bondad de la solución global, permitiendo realizar podas de forma prematura. Esto se realiza mediante la llamada recursiva a la función *redistribuir*, para redistribuir en los siguientes agentes. Las llamadas recursivas continúan hasta que se encuentra un ciclo sin haber llegado hasta los agentes *aOrigen* y *aDestino*, por lo que se detiene la búsqueda. También se puede dar otro caso base, que es cuando los agentes *aOrigen* o *aDestino* se alcanzan, por lo que se evalúa la bondad de la solución. Cuando ambos han sido visitados significa que el proceso de redistribución ha concluido y es coherente por lo que se devuelve la mejor solución.

El algoritmo de refinamiento sucesivo de la solución inicial pese a estar basado en estrategias de fuerza bruta, presenta ciertas características que permiten reducir las necesidades computacionales de forma considerable:

- Parte de una solución optimizada de forma local, lo que evita tener que redistribuir toda la potencia, sino la potencia indirecta que fluye fuera del conjunto de los k agentes vecinos.
- La solución se va refinando de forma iterativa, de forma que el grado de optimización dependerá del tiempo disponible.
- Establece un conjunto de posibles combinaciones de distribuciones a evaluar. El tamaño de dicho conjunto repercute notablemente en el coste temporal. La elección de fracciones de la potencia basadas en el número de agentes alternativos con un mínimo de 5, permite que se evalúen combinaciones con un número suficientemente disperso logrando un equilibrio entre el resultado obtenido y los recursos computacionales necesarios.



```

//Función que optimiza una solución, mientras haya tiempo
//disponible y se mejore significativamente la solución
//Devuelve la bondad de la solución optimizada
Real optimizar(Solución sol) {
    Time tiempo=0;
    tiempo.comienzo();
    Real bondad,potIndirecta,nuevaBondad=MAXIMOVALOR;
    Solución nuevaSol;
    Agente aPenal,aDestino, aOrigen;
    //Obtiene la bondad de la solución actual
    bondad = sol.calcularBondad(criterioOptimización);
    //Se buscan mejores soluciones mientras haya tiempo y se
    //encuentren soluciones significativamente mejores
    Mientras (tiempo < tMaxComputación && nuevaBondad>>bondad){
        aPenal= sol.obtenerAgentePenalizador();
        //Para cada uno agentes a los que se le distribuye
        //potencia indirecta
        Mientras (aPenal.tengaAgentesRequierenPotInd()) {
            potIndirecta =
            aPenal.obtenerSiguientePotenciaIndirecta();
            aDestino= aPenal.obtenerAgenteDestino(potIndirecta);
            aOrigen= aPenal.obtenerAgenteOrigen(potIndirecta);
            //Se redistribuye de forma recursiva la potencia
            //indirecta
            nuevaSol = redistribuir(sol, sol, aOrigen, aDestino,
                potIndirecta);
            nuevaBondad = nuevaSol.calcularBondad();

            //Selecciona la solución mejor
            Si(nuevaBondad. > bondad) {
                sol = nuevaSol;
                bondad = nuevaBondad;
            }
        }
    }
    devuelve bondad;
}

```

Pseudocódigo 4.1. Función que busca una solución con una bondad mayor a la de la solución pasada como parámetro



```

//Función recursiva que redistribuye la potencia indirecta
//entre los caminos alternativos, devuelve solución mejor
ConjuntoAgentes<F,T,C>
redistribuir(Solución sol, Solución mejorSol, Agente aOrigen,
             Agente aDestino, Real potIndirecta)
{
  Entero i,j; Solución nuevaSol;
  Real[][] matrixRedis; //Col agentes, Fila combinaciones pot
  Agente aPenal= sol.obtenerAgentePenalizador();
  //Condición de finalización que evita los ciclos
  Si(aPenal.noVisitado()||(aOrigen.visitado()&&
                          aDestino.visitado())){
    aPenal.haSidoVisitado();
    //Modifica aPenal con la potIndirecta para redistribuir
    aPenal.ModificaPotencia(poteIndirecta);
    Si (aPenal == aOrigen|aDestino) //Caso base
      Si (sol.esMejor(mejorSol))
        mejorSol = sol; //Encuentra mejor Solución
        devuelve mejorSol;
    //Obtiene la matriz que contiene el conjunto
    //representativo de posibles distribuciones
    matrizRedis=
    sol.obtenerMatrizDistribución(aPenal,potIndirecta);
    //Para cada posible distribución(i), cada agente(j)
    Para (i=0) mientras (i<matrizRedis.filas) hacer(i++) {
      Para (j=0) mientras (i<matrizRedis.col) hacer(j++) {
        sol.establecerAgentePenalizador(j);
        //Llamada recursiva para cada agente
        nuevaSol = redistribuir(sol, mejorSol,aOrigen,
                               aDestino, matrizRedis[i][j]);
        Si (mejorSol.esMejor(nuevaSol)) { //Poda
          j=matrizRedis.col;
        }CasoContrario
        Si (j==matrizRedis.col&&nuevaSol.esMejor(mejorSol))
          mejorSol = nuevaSol; //Encuentra mejor Solución
      } }
    } CasoContrario {devuelve mejorSol;//Caso base }
  }
}

```

Pseudocódigo 4.2. Función recursiva que redistribuye la potencia indirecta mediante ramificación y poda, obtiene la bondad de las soluciones obtenidas y devuelve una solución mejorada cercana a la óptima



La figura 4.8 ilustra un sistema eléctrico sencillo, que no considera relevantes las pérdidas eléctricas, compuesto por 2 fuentes de energía $fa1$ y $fa2$, 2 centros de consumo $ca1$ y $ca2$, interconectados a través de las líneas de transmisión $ta1, ta2, ta3$ y $ta4$. Se ha establecido el grado de vecindad en 1, por lo que $ca1.k = 1$ y $ca2.k = 1$. Los agentes sombreados representan sus respectivos conjuntos de agentes vecinos. Se persigue optimizar el uso de fuentes de energía con menor impacto medioambiental por lo que los factores de ponderación tienen los siguientes valores $ecológico = 100$ y el resto 0.

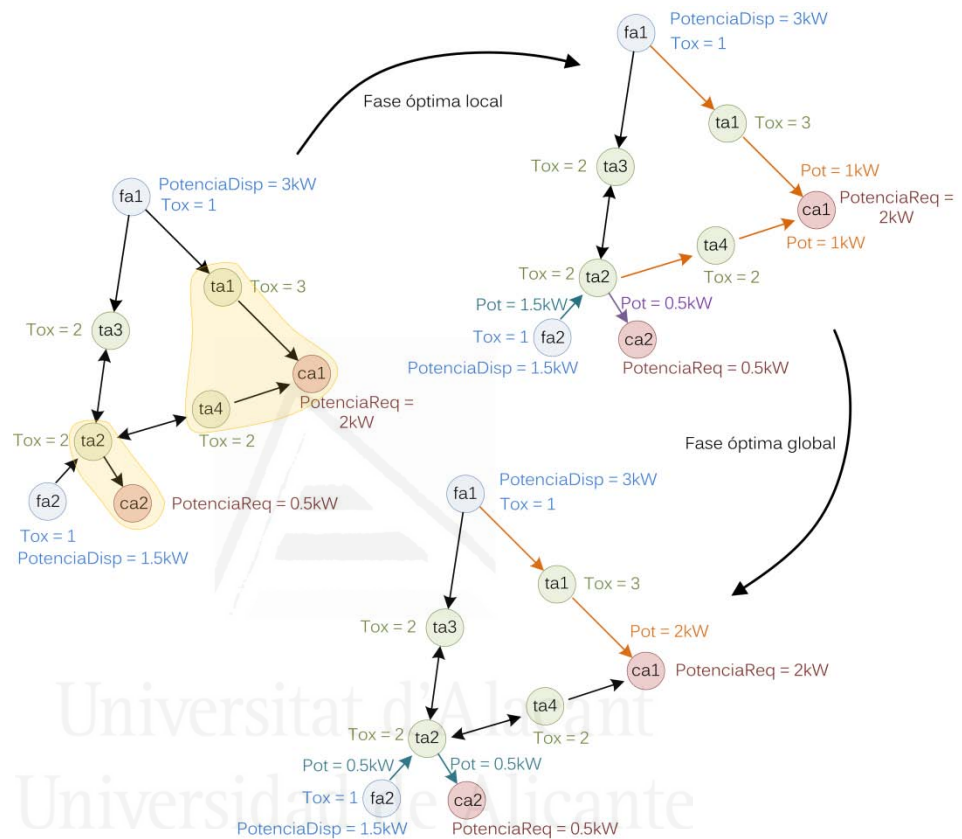


Figura 4.8. Búsqueda de caminos alternativos en la fase de optimización global

Después de la fase de optimización local la solución óptima local presenta las siguientes características: el agente $ca2$ ha elegido la fuente de suministro óptima, $fa2$ a través de $ca2$, lo que supone una bondad relativa a $ca2$ $bondad_{ca2} = Norm(0.5 * (2 + 1)/2) * 1 = Norm(0.75) = 1 - 0.75/10 = 0.925$. En cambio, el agente



$ca1$, al solamente considerar la toxicidad de $ta1$ y $ta4$, ha solicitado potencia en primer lugar a $ta4$, que debido a la capacidad de suministro de $fa2$, solamente es capaz de proporcionar 1kW de potencia, por lo que finalmente $fa1$ ha de aportar 1 kW para satisfacer la demanda energética de 2kW. En este caso, la bondad relativa a $ca1$ es $bondad_{ca1} = Norm((1 * (3 + 1)/4) * 1 + (1 * (2 + 2 + 1)/2) * 1) = Norm(3.5) = 1 - 3.5/10 = 0.65$. Resultando la bondad de la solución $bondad = 1.575$.

Partiendo de la solución anterior, la fase de optimización global determina que $bondad_{ta1} = Norm(1 * (3 + 1)/4) * 1 = Norm(1) = 1 - 1/10 = 0.9$ y que $bondad_{ta2} = Norm((0.5 + 1) * (2 + 1)/2) * 1 = Norm(2.25) = 1 - 2.25/10 = 0.775$. Por lo que se establece el agente $ta2$, al tener menor bondad, como el candidato a redistribuir la potencia indirecta que circula a través de él. En este caso la potencia indirecta es de 1kW que es suministrada desde $fa2$ y que va destinado a $ca1$ a través de $ta4$. El algoritmo de refinamiento sucesivo busca un camino alternativo para que a $ca1$ le llegue el 1kW que requiere. El camino alternativo es a través de $ta1$, siendo la potencia suministrada por $fa1$. Esta nueva solución presenta la siguiente bondad. $bondad'_{ca1} = Norm(2 * (3 + 1)/4) * 1 = Norm(2) = 1 - 2/10 = 0.8$ y $bondad_{ca2} = Norm(0.5 * (2 + 1)/2) * 1 = Norm(0.75) = 1 - 0.75/10 = 0.925$, por lo que se obtiene $bondad' = 1.725$. En este caso, se puede observar como la bondad de la nueva solución es mayor que la de la solución óptima local, por lo que esta solución optimiza el uso de fuentes de energía de mayor respeto medioambiental.



4. Resumen

El presente capítulo describe la gestión de la distribución eléctrica concebida de acuerdo al modelo de sistema multiagente definido en el capítulo anterior. Esta sección ofrece una panorámica que refleja los aspectos de mayor relevancia de la distribución eléctrica, entendida como la distribución de recursos finitos a lo largo de una red con múltiples caminos en función de unos criterios de optimización parametrizables. La figura 4.9 refleja el diagrama de secuencia entre las clases de agentes involucradas. Las clases de agentes, que componen el modelo de sistema multiagente definido en el capítulo anterior, que intervienen de forma directa son: F, T, C y OG , siendo $F \equiv Prod$, $C \equiv Con$ y $T \equiv Prod \cup Con$, por lo que $F \cup T \cup C \equiv Prod \cup Con$. Los que intervienen de forma indirecta son: IU, BA, SP y PM . Los agentes de tipo BA permiten a los agentes de tipo $Prod$ y Con conocer cuales son los agentes vecinos que se encuentran a una distancia menor o igual que k . Los agentes del tipo PM y SP estiman el consumo energético y de generación a partir de las predicciones meteorológicas. Y por último, los agentes de tipo IU permiten visualizar los resultados. Respecto a los agentes que están involucrados de forma directa en la gestión de la distribución, cabe mencionar que la obtención de una solución que esté optimizada de acuerdo a los estados objetivos de cada uno de los agentes está compuesta por dos fases.

La fase de optimización local está compuesta por las interacciones entre los agentes que implementan los roles $Prod$ y Con . Las interacciones se dan entre aquellos agentes que se encuentran a una distancia menor o igual que k definida para cada agente. Las interacciones se pueden clasificar en dos grupos denominados: gestión de suministro y gestión de carga. La gestión de suministro permite a los agentes Con seleccionar a los mejores agentes $Prod$ para que les proporcionen suministro eléctrico. La gestión de carga permite a los agentes $Prod$, cuyo estado sea o pueda ser crítico, solicitar a los agente Con que reduzcan su consumo energético apagando aquellas funcionalidades que no sean esenciales y que no disminuyan la satisfacción del usuario de forma considerable.

La fase de optimización global utiliza la solución obtenida en la fase anterior denominada solución óptima local. El agente de tipo OG aplica un algoritmo, basado en la familia de resolución de problema ramificación y poda, denominado de refinamiento progresivo para la búsqueda de caminos alternativos que mejoren



la bondad de la solución obtenida. Dicha bondad se calcula mediante la suma ponderada y normalizada de los criterios: ecológico, económico y satisfacción. De forma iterativa se buscan soluciones que mejoren a las anteriores mientras que se disponga de tiempo suficiente o hasta que no se encuentren soluciones que mejoren significativamente a la mejor solución obtenida hasta ese momento.

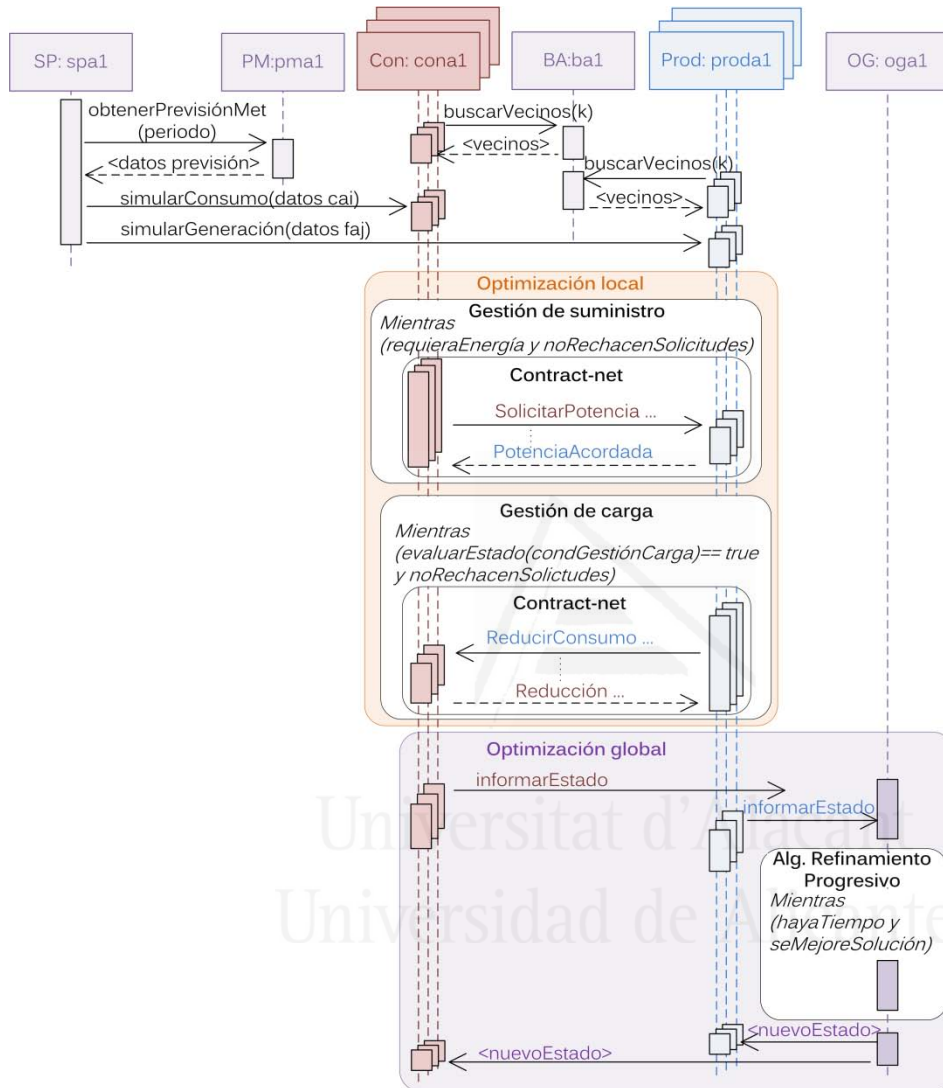


Figura 4.9. Diagrama de secuencia que muestra el resumen de las interacciones entre las clases de agentes involucradas para obtener la distribución energética para un periodo de tiempo determinado



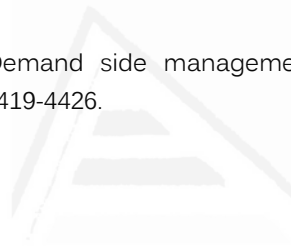
Referencias

(FIPA, 2002) FIPA (2002) FIPA Interaction Protocol Specification
<http://www.fipa.org/repository/ips.php3> Last access on 26/04/2012.

(Gellings and Chamberlin, 1987) Gellings, C. W. and Chamberlin, J. H. (1987)
Demand-side management: Concepts and methods.

(Odell et al., 2000) Odell, J., Arbor, A. and Bauer, B. (2000) Extending UML for
Agents. *Group*, 1001, 1-15.

(Strbac, 2008) Strbac, G. (2008) Demand side management: Benefits and
challenges. *Energy Policy*, 36, 4419-4426.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Capítulo cinco

Prototipado basado en el Modelo Tecnológico

El capítulo ilustra el proceso de prototipado de instalaciones, sistemas y redes eléctricas utilizando como base el modelo estructural definido en el capítulo tercero. Con tal fin, se define el modelo tecnológico acorde al modelo estructural sobre el framework JADE obteniendo como resultado el framework para el desarrollo de sistemas multiagente para la distribución eléctrica fdSMADE. Seguidamente, se muestra el entorno de prototipado pSMADE concebido como un ente independiente que permite diseñar las instalaciones eléctricas a gestionar, crear automáticamente el sistema multiagente específico haciendo uso de fdSMADE, simular el comportamiento íntegro del sistema multiagente concreto a la instalación a gestionar y así poder refinar el valor de los parámetros que condicionan las estrategias de gestión de la distribución eléctrica.

1. Introducción

El presente capítulo describe en profundidad el proceso de desarrollo basado en arquitecturas dirigidas por modelos (MDA) definido dentro de la metodología, haciendo especial hincapié tanto en el modelo tecnológico, obtenido para un framework de desarrollo de sistemas multiagente concreto, como en la obtención de soluciones específicas a problemas particulares. La figura 5.1 ofrece una panorámica de la metodología FET, definida en el segundo capítulo, que pone en relieve todo lo relativo al desarrollo e implantación de los modelos funcional y estructural definidos en el tercer capítulo. Por tanto, el capítulo se centra en la parte delimitada por líneas discontinuas para describir el modelo tecnológico, que es en sí mismo un framework para el desarrollo de sistemas multiagente de distribución eléctrica *fdSMADE*, y el entorno de prototipado *pSMADE*, que permite obtener de forma rápida soluciones para problemas concretos y evaluar su comportamiento. Para ello, las tareas que componen la fase de implantación se describen con mayor nivel de detalle en las siguientes secciones.

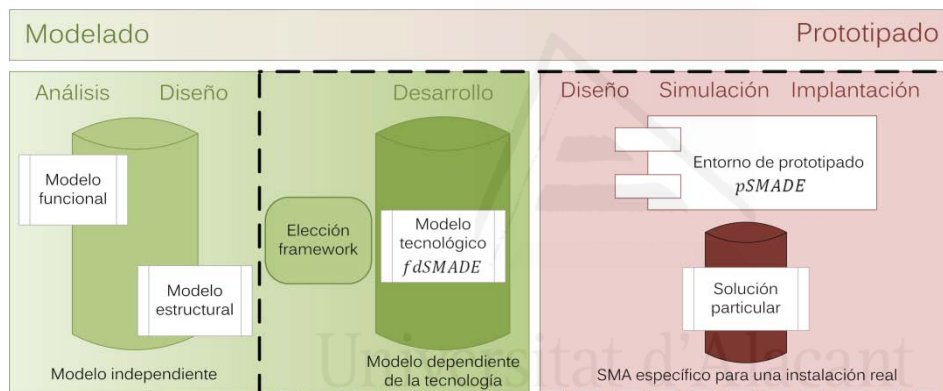


Figura 5.1 Panorámica de la Metodología FET que realiza el desarrollo de la solución a un problema particular instanciando el modelo tecnológico

Una vez definidos los modelos funcional y estructural, el siguiente paso consiste en elegir el framework para el desarrollo de agentes que mejor se adapte a las características de los modelos desarrollados previamente. En función de las características insólitas de dichos modelos y de las particularidades de los frameworks para el desarrollo de sistemas multiagente existentes, puede ocurrir que instanciar el modelo estructural en alguno de los frameworks existentes sea



una tarea compleja. Con el fin de evitar el desarrollo de un framework ad-hoc para el modelo estructural desarrollado previamente, la tarea de elección del framework se considera que está a caballo entre la fase de *diseño* y *desarrollo*. Debido a que la elección del framework está determinada por el modelo estructural y recíprocamente, de forma casi imperceptible, el modelo estructural debe reflejar algunas de las particularidades propias del framework con el que se trabajará más adelante.

Existen multitud de frameworks, tanto de uso comercial como académico, para el desarrollo de sistemas multiagente. Entre los más populares cabe destacar: Aglets (Lange and Mitsuru, 1998), Cougaar (Helsingier and Wright, 2005), JACK Intelligent Agents (Howden et al., 2001), JADE (Bellifemine et al., 2001), JADE-LEAP (Moreno et al., 2003), JADEX (Pokahr et al., 2005), INGENIAS (Gómez-Sanz et al., 2010), MadKit (Gutknecht et al., 2001), Retsina (Sycara et al., 1996), ZEUS (Nwana et al., 1999), etcétera. Existen diversos trabajos en los que se comparan y evalúan dichos frameworks: (Ribeiro et al., 2011) (Leszczyna, 2008) (Mulet et al., 2006), (Weyns et al., 2005), (Braubach et al., 2005), (Lucena et al., 2004), (Leszczyna, 2004), (Camacho et al., 2002), (Nguyen et al., 2002), (Ricordel et al., 2000). Cada trabajo de evaluación tiene en cuenta un subconjunto distinto de frameworks y utilizan distintos criterios a la hora de compararlos. A partir de dichos trabajos se analizan y resumen las características y particularidades de dichos frameworks.

La arquitectura de Aglets está orientada hacia la movilidad de los agentes. Está implementado en Java y se encuentra disponible bajo código abierto. La comunicación está basada en intercambio de mensajes, tanto síncronos como asíncronos entre los agentes. Se utiliza la comunicación multicast para que un agente se pueda suscribir a los mensajes multicast enviados por otro agente.

Cougaar está orientado hacia la resolución lógica de problemas de planificación. Está implementado en Java y se encuentra disponible bajo código abierto. Cada agente está dotado de una pizarra que es utilizada para la comunicación entre agentes. La arquitectura permite la comunicación directa entre agentes, de forma asíncrona.

JACK Intelligent Agents es uno de los frameworks tradicionales para el desarrollo de agentes BDI. Está basado en el modelo BDI dMARS (d'Inverno et al., 1997). Es compatible con el estándar FIPA, está desarrollado en Java y su uso está extendido en el ámbito profesional. Está compuesto por tres componentes: el componente Jack Agent Language (JAL) es un lenguaje que cubre la sintaxis de



Java y proporciona definiciones orientadas a agentes; Una vez que se ha escrito código JAL, se utiliza el componente JACK Agent Compiler convierte el código JAL en código JAVA; y el tercer componente JACK Agent Kernel ejecuta los programas escritos en JAL. Está en consonancia con la propuesta original BDI (Bratman, 1987).

JADE es uno de los frameworks más utilizados en el ámbito académico y también en menor medida en el sector industrial. Está desarrollado en Java y es totalmente compatible con el estándar FIPA. La arquitectura define una plataforma que está compuesta como mínimo por un contenedor, de forma que los agentes se ubican en los contenedores. Se pueden crear contenedores en distintos nodos de computación lo que permite desplegar un conjunto de agentes a lo largo de una red de computadores. Está orientado a facilitar las comunicaciones entre los agentes, ya que implementa diversos protocolos de interacción. Permite la comunicación asíncrona, síncrona y multicast entre agentes mediante el envío de mensajes FIPA-ACL. Su uso está orientado hacia agentes reactivos, aunque se pueden desarrollar agentes deliberativos programando de forma explícita la inteligencia del agente.

JADE-LEAP permite el desarrollo de agentes JADE para dispositivos que disponen de menos recursos computacionales, siendo apropiado para su uso en dispositivos móviles que estén dotados de: Java Micro Edition (J2ME) Connected Device Configuration (CDC), J2ME Mobile Information Device Profile (MIDP), Android o incluso el framework .Net, válido para equipos de mayor potencia.

JADDEX permite desarrollar agentes de tipo BDI, siendo compatible con JADE lo que permite integrar agentes BDI en plataformas JADE. Cada agente está compuesto por un fichero XML que contiene una descripción con el estado inicial del agente, objetivos, planes, deseos, creencias y por una clase JAVA que contiene el plan que utiliza las creencias, y permite determinar en cada momento los objetivos a satisfacer. Está orientado hacia el desarrollo de agentes deliberativos.

El kit de desarrollo INGENIAS permite potenciar las capacidades deliberativas de los agentes del framework JADE y para ello se utiliza el INGENIAS Agent Framework (IAF) y un editor visual. El IAF se encarga de traducir la especificación de agentes realizada en código válido para el framework JADE. Los agentes en INGENIAS están compuestos de estados mentales, objetivos, tareas e interacciones en las que participan. Proporciona un especial énfasis en permitir simulaciones.



MadKit es un framework basado en JAVA orientado hacia las relaciones de organización entre grandes conjuntos de agentes. La arquitectura de los agentes consta de un núcleo de tamaño reducido y la arquitectura de la plataforma está basada en las relaciones Agente/Grupo/Rol. De forma que un agente es miembro de un grupo e implementa roles que están definidos en dicho grupo. Facilita la creación de sistemas multiagente organizados en grupos que actúan de forma colectiva en un primer nivel y que un segundo plano cada agente tiene sus iniciativas particulares, siempre y cuando no se desvíen de las colectivas. La comunicación se da a nivel de agentes de forma asíncrona mediante el envío de mensajes. También es posible utilizar mensajes de multicast para un rol dentro de un grupo concreto.

Retsina es una plataforma de código abierto que soporta agentes heterogéneos que está construida a base de capas. Permite la comunicación directa entre agentes y comunicación multicast para el descubrimiento de componentes de infraestructura. El lenguaje de comunicación utilizado entre agentes es Knowledge Query and Manipulation Language (KQML) por el contrario del FIPA-ACL. La arquitectura de la plataforma está compuesta por dos niveles. El primero lo constituyen los agentes de nombre servicio (ANS) que se encargan de abstraer la localización física de los agentes a través de un identificador de agente. El segundo nivel está formado por los agentes intermediarios que se encargan de emparejar a los agentes que están buscando un determinado servicio con los proveedores de dicho servicio. Esta arquitectura facilita el uso de esquemas de comunicación tipo "broker".

Por último, el framework liberado bajo código abierto ZEUS facilita el desarrollo rápido de aplicaciones basadas en agentes colaborativos. Soporta el estándar FIPA, y para la comunicación entre agentes utiliza mensajes asíncronos. El proceso deliberativo de cada agente está basado en objetivos y acciones incluyendo una serie de recursos y precondiciones que han de darse.

La amplia gama de frameworks existentes se pueden clasificar entre los que están orientados hacia agentes deliberativos BDI o hacia agentes reactivos. Las clases de agentes híbridas definidas en el modelo estructural son: F, T y C, ya que presentan un razonamiento propio condicionado por los estímulos que perciben y reciben. En cambio, el resto de clases de agentes son esencialmente reactivos: IU, BA, OG, SP y OG, aunque este último presenta un razonamiento propio, por lo que puede considerarse como híbrido también. A pesar de que algunas de las clases



presente mecanismos de razonamiento basados en objetivos propios, no es imprescindible utilizar un framework que facilite el desarrollo de agentes BDI, ya que el modelo de agente propuesto hace especial uso de las comunicaciones e interacciones entre agentes. Por lo que es conveniente utilizar un framework que facilite el desarrollo de agentes reactivos y les permita incorporar mecanismos deliberativos. A la hora de elegir entre ellos, es conveniente tener en cuenta que conforme los frameworks se van especializando en aspectos concretos, a menudo llevan asociado una metodología de desarrollo de agentes ad-hoc a dicho framework. Además, ninguno de ellos permite la composición de agentes de forma recursiva, la que más se aproxima es MadKit que permite crear grupos de agentes, existiendo en dichos grupos agentes líderes. Por lo tanto, los requerimientos que debe satisfacer el framework se pueden resumir en: admitir la metodología propuesta en el capítulo segundo; ser capaz de representar la composición de agentes; facilitar la comunicación e interacción; permitir el desarrollo futuro, no se descarta implementar algunas clases de agentes como agentes BDI y/o utilizar dispositivos móviles. El framework JADE es el que mejor encaja con los requerimientos planteados, ya que permite integrar agentes BDI desarrollados con JADEX. Sin llegar a olvidar la extensión JADE-LEAP, que permite adaptar fácilmente las clases de agentes para dispositivos móviles o de reducida capacidad de cómputo. Esto unido al especial énfasis en facilitar la comunicación y protocolos de interacción entre agentes junto con el hecho de ser uno de los más utilizados, ofrece garantías suficientes de potencia, continuidad y evolución del framework JADE.



2. Modelo tecnológico

De acuerdo a la filosofía del enfoque MDA, a partir del modelo independiente, denominado modelo estructural en la metodología, se obtiene el modelo dependiente de la plataforma o tecnología específica que permita implementarlo, denominado modelo tecnológico. Por lo tanto, en esta sección se particulariza el modelo estructural para el framework JADE, dando lugar a su correspondiente modelo tecnológico que es a su vez un framework especializado denominado *fdSMADÉ* situado en una capa superior a JADE.

2.1. Plataforma JADE

La plataforma o framework JADE es compatible con el estándar FIPA, por lo que la arquitectura de la plataforma de agentes JADE está en consonancia con el modelo de referencia de plataformas de agentes FIPA. La plataforma de agentes puede estar distribuida entre varios nodos de computación o host. Entre ellos, se elige un host como contenedor de agentes principal y el resto como contenedores de agentes.

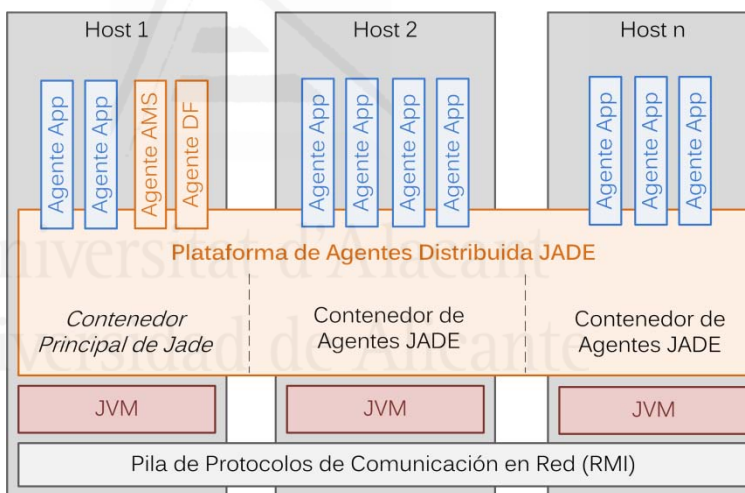


Figura 5.2 Arquitectura de la plataforma de agentes JADE



Los contenedores de agentes almacenan conjuntos de agentes que componen la aplicación en sí, realizando su cometido en el propio host que los alberga. El contenedor principal, además de lo anterior, también se encarga de contener al agente servicio de directorio (DF) y al agente de administración del sistema (AMS). El agente DF ofrece servicio de búsqueda a modo de páginas amarillas. En cambio, AMS representa a la autoridad en la plataforma. Se encarga de gestionar el servicio de nombres garantizando que sean únicos en la plataforma, permite crear/eliminar agentes y/o contenedores de la plataforma. Cada host debe tener instalado una máquina virtual de JAVA (JVM), debido a que JADE se ejecuta sobre dicha máquina virtual. La comunicación entre los agentes que se encuentran en distintas plataformas se realiza a través del mecanismo ofrecido por JAVA Remote Method Invocation (RMI). Dicha arquitectura se aprecia en la figura 5.2 (Bellifemine et al., 2010).

El desarrollo de un agente en la plataforma JADE se realiza creando una clase de agente que hereda de la clase `jade.core.Agent` y especificando en el método `void setup()` la configuración inicial del agente, así como los comportamientos que implementa.

Los comportamientos son las acciones que se ejecutan ante determinados eventos, mensajes y/o condiciones. Existen diversos tipos de comportamientos que pueden ser clasificados en simples y compuestos. Los principales comportamientos simples son `OneShotBehaviour` y `CyclicBehaviour`. El primero se ejecuta una única vez y su hilo de ejecución termina al finalizar su cometido. El segundo no finaliza nunca, es cíclico, por lo que suele utilizarse para crear demonios al estilo Unix. Entre los comportamientos compuestos cabe destacar: `FSMBehaviour`, `SequentialBehaviour`, `ParallelBehaviour`, `CompositeBehaviour` y `Behaviour`. Los 5 permiten componer comportamientos con la única diferencia del orden en el que se ejecutan. Los 2 primeros son similares ya que permiten que se ejecute un comportamiento a continuación de otro. El primero está orientado a crear máquinas de estados finitos y el segundo es más genérico permitiendo que se establezca una secuencia fija entre los comportamientos. El tercero permite que varios comportamientos se ejecuten simultáneamente de forma que no exista ninguna relación entre la finalización de uno y el comienzo de otro. El cuarto es una clase abstracta de la que heredan los anteriores comportamientos y por lo tanto permite la composición de comportamientos. La última representa la clase base abstracta de la que heredan todos los comportamientos. El cometido del comportamiento lo determina el método `Action()`, siendo posible bloquear el



comportamiento mediante el método **Block()** y quedarse a la espera de que le llegue un determinado mensajes de tipo **ACLMessage** o se dé alguna condición como podría ser el cambio de estado del agente. Los comportamientos son totalmente dinámicos porque se pueden añadir o eliminar en tiempo de ejecución. Cada uno de los comportamientos, que implementan alguno de los protocolos de interacción, está compuesto por los métodos que se encargan de enviar mensajes, y recibirlos a lo largo del proceso de negociación. En el caso de la clase **ContractNetReponder** implementa la parte del protocolo de interacción FIPA contractNet, que gestiona el destinatario o receptor de un mensajes enviado por la clase **ContractNetInitiator**, que a su vez implementa la otra mitad del protocolo.

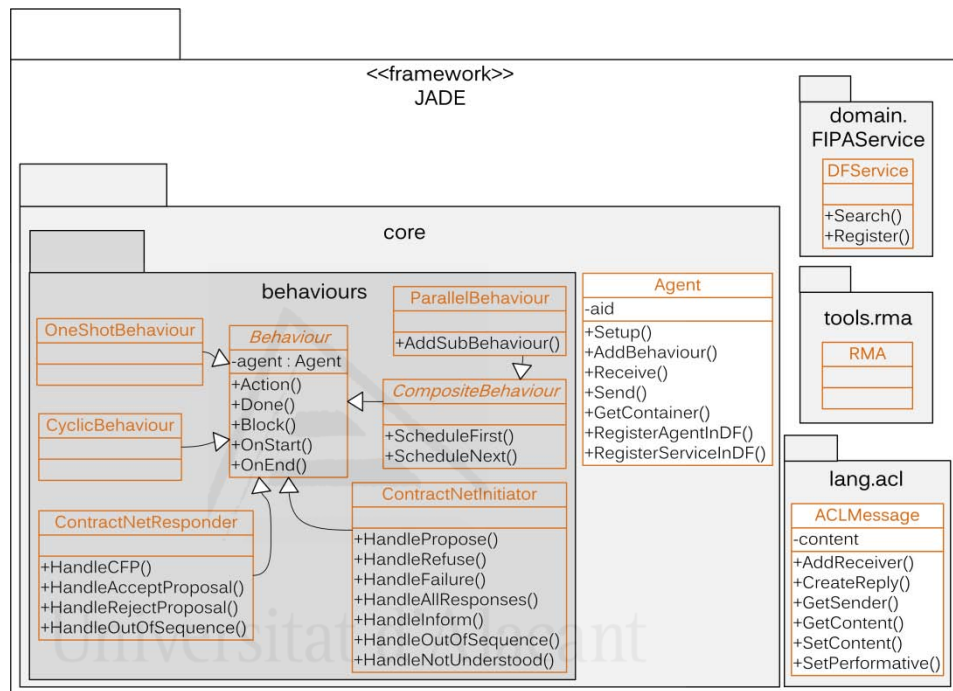


Figura 5.3 Diagrama de paquetes UML que muestra las principales clases utilizadas del framework JADE

La relación entre las clases, que componen JADE, se muestra en la figura 5.3. Se aprecia el diagrama de paquetes UML que muestra las relaciones de composición entre los principales paquetes. Además, se muestran las principales clases utilizadas para: la creación de nuevos agentes (**jade.core.Agent**); la creación de comportamientos (**jade.core.behaviours.***); el paso de mensajes



ACL (`jade.lang.acl.ACLMessage`); el uso de agentes Remote Monitoring Agents, RMA, (`jade.tools.rma`), que permiten gestionar de forma remota la plataforma de agentes y agentes DF (`jade.domain.FIPAService`).

2.2. Relaciones entre modelo estructural y JADE

Las características del modelo estructural deben ser reflejadas e implementadas utilizando el framework JADE. Algunas de ellas presentan una especial relevancia debido a su singularidad o importancia para el correcto funcionamiento. A continuación, se detallan las relaciones relevantes entre las entidades concebidas en el modelo y las funcionalidades que ofrece JADE. La tabla 5.1 recoge las equivalencias entre ambos.

Modelo Estructural	JADE
Región	Contenedor
Clase de agente	<code>jade.core.Agent</code>
Rol	<code>jade.core.behaviours.*</code>
Composición de roles	<code>jade.core.behaviours.CompositeBehaviour</code>
Composición de agentes	Estructura lógica y paso de mensajes
Protocolos de interacción	<code>jade.proto.*</code>

Tabla 5.1 Relaciones entre los conceptos del modelo estructural y la plataforma de agentes JADE

Las regiones δ_i definidas en el entorno E , donde el sistema multiagentes se encuentra ubicado, se pueden representar mediante los contenedores que permiten distribuir la plataforma de agentes entre varios hosts. La distribución de los agentes entre los contenedores definidos en la plataforma facilita la ejecución



distribuida y paralela entre los diversos hosts a costa de utilizar mecanismos de comunicación que añaden un tiempo extra. El número de contenedores a utilizar y los agentes que deben ejecutarse en cada uno varía en función del problema concreto a resolver, por lo que el criterio utilizado es el de crear un contenedor por cada una de las regiones δ_i definidas en el modelo del entorno E para cada caso. La relación de pertenencia de un agente a una región es determinada por la función *Locate* ^{α} , por lo que también es utilizada para establecer el contenedor en el que va a realizar su cometido.

Cada una de las clases de agentes definidas en el modelo se implementa heredando de la clase `jade.core.Agent` que proporciona la base tanto para la comunicación como para la ejecución de comportamientos. Por su parte, el estado de los agentes definido en s_i^α se representa mediante un conjunto de atributos que pueden adoptar valores dentro del dominio definidos para ellos.

Los roles r_i^α definidos para el agente α se pueden representar como comportamientos debido a la proximidad semántica de las definiciones de rol y de comportamiento, ya que de forma implícita un rol lleva asociado un comportamiento propio. En función de la naturaleza del rol es conveniente elegir el comportamiento que mejor se adapte a su cometido. El estado de cada rol $s_i^{r_j}$, de forma análoga a las clases de agentes, se puede representar mediante atributos propios a la clase que hereda del tipo de comportamiento a implementar. La composición de los roles, que es determinada por la función *ComposeR* ^{α} , es implementada de forma implícita por el tipo de comportamiento compuesto utilizado, cuya clase base es `CompositeBehaviour`, siendo los principales comportamientos compuestos: máquina de estados finitos, secuencial o paralelo.

La composición de agentes permite crear organizaciones complejas que establecen niveles de abstracción entre los agentes gracias a los siguientes elementos: agente del nivel superior a^{α_i} y el conjunto de agentes del nivel inferior θ^{α_i} . JADE aunque no facilita la creación de relaciones de composición de agentes de forma implícita, permite que se realice a nivel de aplicación de forma explícita. Para ello, se crean todos los agentes definidos en cada uno de los niveles en el contenedor que le corresponda. Cada uno de esos agentes contiene la información lógica de las relaciones de parentesco padre/hijos que representan los niveles de abstracción superior e inferior. De forma que los agentes definidos en últimos niveles de la estructura comienzan el proceso de distribución de energía eléctrica entre ellos. En el caso de que las necesidades energéticas lo



requieran y no haya suficiente energía en el mismo nivel, si es posible se importa desde el nivel de abstracción superior. De esta forma se permite a los agentes del último nivel importar/exportar energía eléctrica sin que existan conexiones físicas directas a través de los distintos niveles de abstracción definidos. Este funcionamiento está inspirado en las estrategias de enrutamiento en las redes TCP/IP, de forma que cuando un router recibe un paquete dirigido a una dirección IP que no está en su red, la envía al router del nivel superior que está asociado a la puerta de enlace por defecto. Además de permitir el flujo de energía entre los distintos niveles, cada uno de los agentes es capaz de recoger el estado de los agentes que dependen de él, es decir, los agentes hijos que pertenecen a θ^{α_i} . La información que recoge es el sumatorio de la energía eléctrica generada y consumida en el nivel inferior y la importada y exportada a otros niveles de forma que la suma de la energía importada y generada ha de ser equivalente a la exportada y consumida.

Respecto a los protocolos de interacción utilizados en el modelo estructural están implementados directamente en la plataforma JADE, por lo que hay que instanciarlos y utilizarlos de forma que únicamente hay que escribir el código a ejecutar cuando se recibe un mensaje o cuando se quiere enviar un mensaje a otro agente. Normalmente los protocolos de interacción son llevados a cabo por los comportamientos.

2.3. Framework para el desarrollo de sistemas multiagente para la distribución eléctrica *fdSMADÉ*

Una vez identificadas las principales equivalencias entre el modelo estructural y el framework JADE, se procede a detallar el modelo tecnológico, que está constituido por el framework para el desarrollo de sistemas multiagente para la distribución eléctrica *fdSMADÉ*. Permite utilizar las clases de agentes definidas en el modelo estructural para el diseño y simulación de redes e instalaciones eléctricas, orientadas a la distribución energética con capacidad de gestionar cargas. El framework está desarrollado sobre JADE, como una capa situada sobre dicho framework, por lo que se presenta una relación de dependencia de JADE.

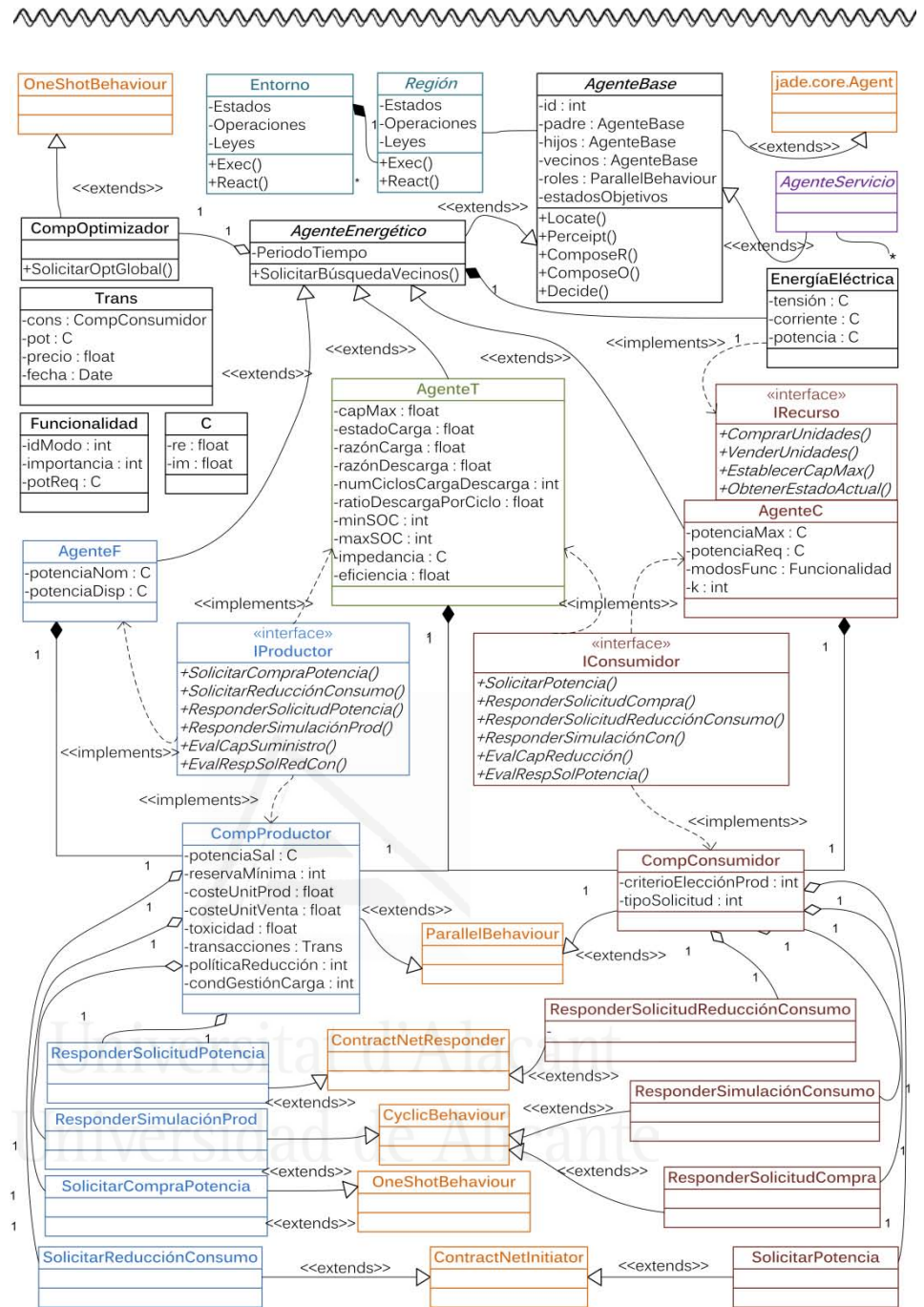


Figura 5.4 Diagrama de clases UML parcial que muestran las clases que componen los tipos de agentes F, T y C

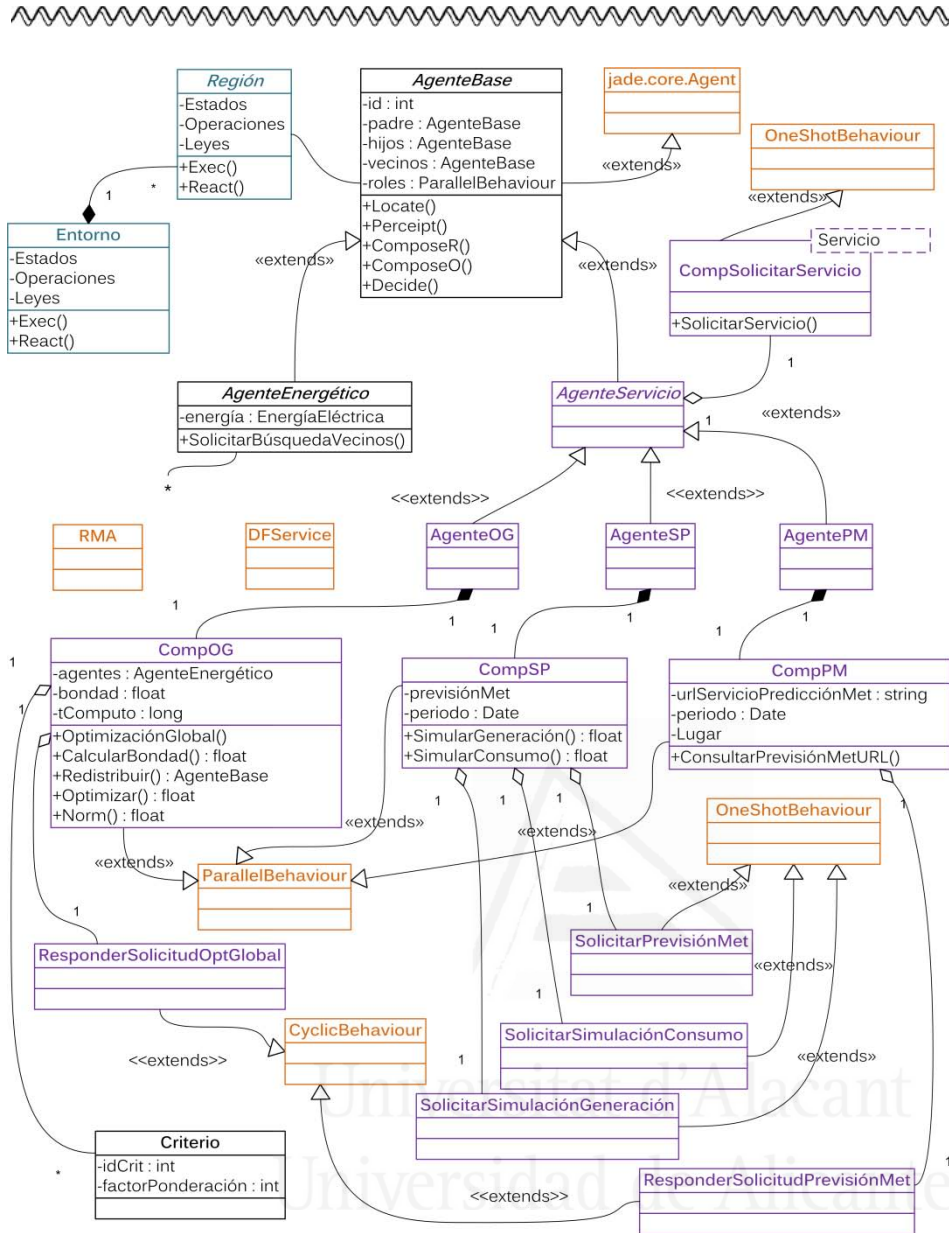


Figura 5.5 Diagrama de clases UML parcial que muestra las principales clases que componen los tipos de agentes OG, SP y PM

El framework permite crear instancias de los tipos de agentes definidos en el modelo estructural a través de las siguientes clases: $F \equiv \text{AgenteF.java}$, $T \equiv \text{AgenteT.java}$, $C \equiv \text{AgenteC.java}$, $PM \equiv \text{AgentePM.java}$, $SP \equiv \text{AgenteSP.java}$,



$OG \equiv \text{AgenteOG.java}$. Los tipos de agentes BA e IU , no se han desarrollado explícitamente ya que ha sido posible utilizar agentes análogos proporcionados por JADE. El agente $DFService$ permite realizar búsquedas y el agente RMA que permite gestionar de forma remota la plataforma de agentes gracias a la interfaz gráfica de usuario que ofrece.

Las clases más importantes que componen el framework $fdSMADe$ se pueden observar en el diagrama de clases UML mostrado parcialmente en la figura 5.4 y la figura 5.5. La primera de ellas muestra las clases $AgenteF$, $AgenteT$ y $AgenteC$ que dan soporte a los agentes de tipo F , T y C respectivamente. Cada una de estas clases hereda de la clase abstracta $AgenteEnergético$ que a su vez hereda de $AgenteBase$, también abstracta, que finalmente hereda de $jade.core.Agent$, proporcionada por JADE. Asimismo, la clase abstracta $AgenteServicio$, también hereda de $AgenteBase$, y permite particularizarla para obtener las clases que dan soporte a los agentes que proporcionan servicios. Esta estructura jerárquica de clases sigue la línea de la estructura de clases de agentes obtenida durante la tarea A1 de la metodología de desarrollo propuesta en el capítulo 2. Dicha estructura en tres niveles permite establecer en el primero, $AgenteBase$, los atributos y operaciones definidos en el modelo de agente propuesto en el capítulo 3. El siguiente nivel particulariza la clase $AgenteBase$ en las clases que dan soporte a los agentes que gestionan energía eléctrica $AgenteEnergético$, y los que proporcionan servicios $AgenteServicio$. En el caso de $AgenteEnergético$ está compuesto por la clase $EnergíaEléctrica$, que representa el recurso a distribuir e implementa la interfaz $IRecurso$, que proporciona una interfaz común e independiente del tipo de recurso a distribuir. Esta interfaz abre la posibilidad de utilizar el framework para la distribución de otro tipo de recursos distintos a la energía eléctrica, que compartan una serie de características, ya que de esta forma la integración es prácticamente inmediata. Además, $AgenteEnergético$ incorpora el comportamiento $CompOptimizador$ para solicitar al agente de tipo OG que optimice la solución obtenida durante la fase de optimización local. Las clases que particularizan a $AgenteServicio$, por motivos de claridad, se muestran y se describen en detalle en la figura 5.5. El tercer nivel que deriva de $AgenteEnergético$ añade los roles definidos en el modelo estructural y desarrollados como comportamientos en el tecnológico a cada una de las 3 clases que componen el tercer nivel. Las clases $AgenteF$ y $AgenteT$ están compuestas por el rol productor a través del comportamiento compuesto $CompProductor$ y por un subconjunto de los atributos definido en su respectivo



modelo de agente. El resto de atributos comunes a ambos aparecen en el propio comportamiento. Tanto el comportamiento como dichas clases implementan la interfaz `IProductor` que facilita la utilización de dicho comportamiento en `AgenteF` y `AgenteT`, siendo capaz de modificar el contenido de los métodos definidos en dichas clases, lo que permite modificar la toma de decisiones de cada clase de agentes. De esta forma, el comportamiento que establece los mecanismos y protocolos de comunicación es compartido por ambos, pero la toma de decisiones es propia de cada uno. De forma análoga, las clases `AgenteC` y `AgenteT` están compuestas por el subconjunto de atributos propios y por el rol consumidor a través del comportamiento compuesto `CompConsumidor`, que a su vez implementa la interfaz `IConsumidor`, al igual que `AgenteC` y `AgenteT`. Cada uno de estos comportamientos son una particularización del comportamiento `jade.core.behaviours.ParallelBehaviour`, que permite lanzar en paralelo los comportamientos de tipo `ResponderXXX` y en función del estado del agente y gracias al método `Decide` de la clase `AgenteBase` y sus estados objetivos `estadosObjetivos` se lanzan los comportamientos de tipo `SolicitarXXX`. Finalmente, los comportamientos individuales en función de los protocolos de interacción definidos heredan de las clases `jade.core.behaviours.ContractNetInitiator`, `.ContractNetResponder`, `.ContractNetInitiator`, `.CyclicBehaviour` y `.OneShotBehaviour`.

La figura 5.5 representa la parte del diagrama de clases UML que complementa al mostrado en la figura 5.4. Refleja las principales clases que dan soporte a los tipos de agentes especializados de `AgenteServicio`. Las clases de agentes definidas en el modelo estructural que proporcionan servicios son 5: `BA`, `IU`, `SP`, `OG` y `PM`; debido a que `BA` y `IU` las implementa de forma nativa JADE, en el diagrama únicamente se detallan el resto. La correspondencia entre los tipos de agentes del modelo estructural y tecnológico son: `BA` \equiv `jade.domain.FIPAServicio.DFServicio`, `IU` \equiv `jade.tools.rma.rma`, `SP` \equiv `AgenteSP`, `OG` \equiv `AgenteOG` y `PM` \equiv `AgentePM`. Las tres últimas clases derivan de la clase abstracta `AgenteServicio` y están compuesta por el rol que permite solicitar servicios de otros agentes, que es implementado de forma genérica mediante el comportamiento parametrizado `CompSolicitarServicio<Servicio>`. Cada una de las clases que definen a los 3 tipos de agentes está compuesta por su rol correspondiente implementado como una especialización de comportamiento `jade.core.behaviours.ParallelBehavior`, compuesto por los comportamientos

de tipo `ResponderXXX`, y `SolicitarXXX` particularizados a partir de `CyclicBehaviour` y `OneShotBehaviour` respectivamente.

Las clases mostradas en los diagramas de clases anteriores se encuentran agrupadas tal y como ilustra el diagrama de paquetes UML de la figura 5.6. Se aprecia un primer nivel compuesto por el `Entorno` y por `Agentes`. El paquete `Agentes`, a su vez, está compuesto por los subpaquetes `Energéticos`, `Servicios` y `Roles`, estando este último formado por los roles asociados a `Productor`, `Consumidor` y `Servicios`.

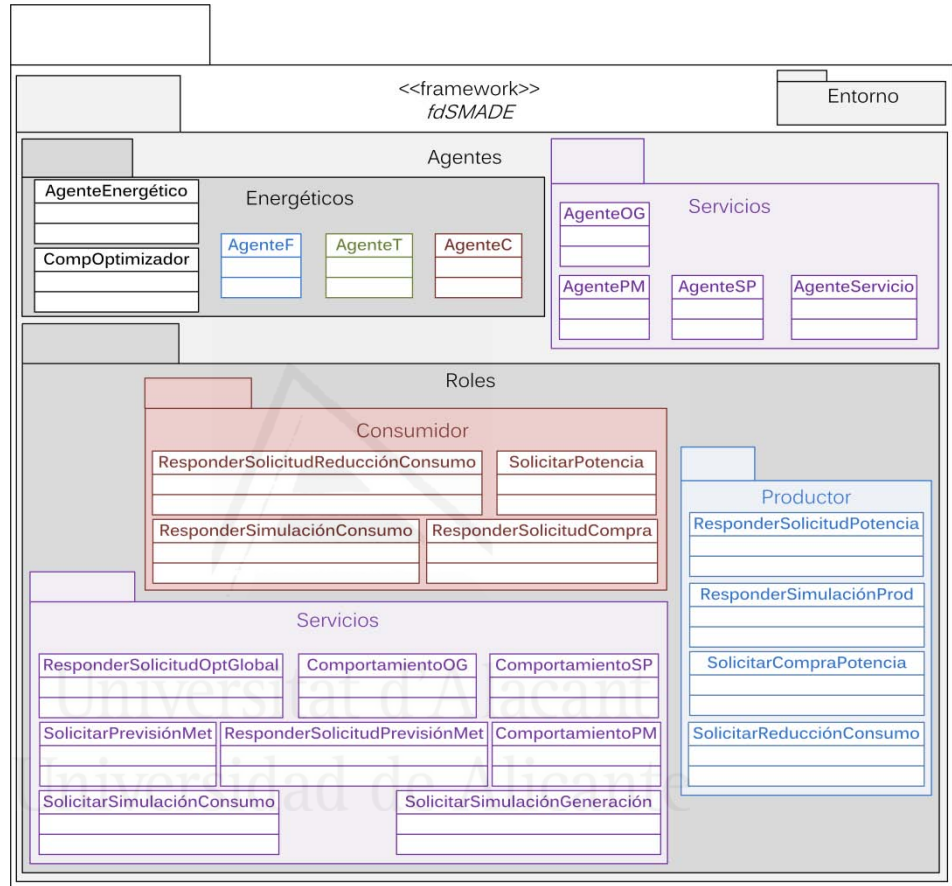


Figura 5.6 Diagrama de paquetes UML que muestra las clases que contienen cada uno de los paquetes que componen el framework

El framework `fdSMADe`, concebido como el modelo tecnológico asociado a JADE, puede ser utilizado como una librería Java convencional denominada



fdSMADe.jar o puede ser utilizada en conjunción con un entorno de prototipado que facilite la representación de problemas concretos con dicho framework.

2.3.1. Comportamiento de agentes de servicios

Los agentes que proporcionan servicios que se han implementado en el framework *fdSMADe* son 3: **AgenteOG**, **AgentePM** y **AgenteSP**. El comportamiento del primero de ellos se ha descrito en el capítulo cuarto, concretamente en la fase de optimización global. En cambio, los otros dos se detallan a continuación.

El agente de predicción meteorológica **AgentePM**, se encarga de obtener datos climatológicos, definidos en el capítulo tercero (radiación solar, velocidad viento, humedad relativa y la pluviosidad), asociado a una zona geográfica (latitud y longitud) para un determinado periodo de tiempo (inicio, fin).

El agente obtiene dichos datos a través de servicios web ofrecidos por entidades que registran los fenómenos meteorológicos. Los servicios o bases de datos que ofrecen previsiones con la información que se necesita suelen ser de pago. En cambio, los gratuitos presentan algunas carencias, ya sea porque no contienen todos los datos que se necesitan, o porque únicamente permiten acceder al histórico, por lo que no se pueden realizar previsiones. El criterio para elegir el servicio está determinado por la fiabilidad de la información, y la naturaleza accesible de los datos. Por lo tanto, el **AgentePM** utiliza dos servicios complementarios.

El primero de ellos se trata de OpenSolarDB (OpenSolarDB, 2010), que es una base de datos abierta que contiene información de radiación solar diaria para cada mes del año por país. Permite consultar datos ya almacenados, con un retraso de 48 horas. Aunque la información proporcionada no sea todo lo detallada que se quisiera, ya que son medias mensuales, se puede utilizar de forma complementaria con el segundo servicio.

El segundo servicio lo constituye la agencia estatal de meteorología (AEMET, 2013) que aunque por sí solo no proporciona todos los datos necesarios, ofrece los complementarios a los ofrecidos por OpenSolarDB. Permite acceder a datos relativos a las previsiones diarias por horas de hasta 4 días de: temperatura mínima y máxima, humedad relativa, probabilidad de precipitaciones, y velocidad



del viento. Aunque no proporciona datos relativos a la radiación solar, se pueden utilizar los datos de temperatura mínima y máxima combinados con la media de la radiación solar mensual obtenida de OpenSolarDB. De esta forma se puede ponderar la radiación solar mensual, en función de la temperatura máxima y mínima del día.

El agente de simulación de potencia **AgenteSP**, se encarga de simular la potencia que cada **AgenteF** y **AgenteC** suministra/consume en cada instante. Los valores de simulación tanto de generación como de consumo se le pasan como parámetros.

A continuación se detalla los modelos de generación de los tipos de fuentes de energía renovables más comunes. En el caso de las fuentes de energía basadas en placas fotovoltaicas, la potencia generada se ha calculado utilizando el modelo propuesto por (Faisal, 2008) que se puede observar en la ecuación 3.2. Dicho modelo tiene en cuenta los siguientes parámetros: PST_C la potencia máxima que las placas fotovoltaicas son capaces de entregar en condiciones idóneas tanto de temperatura como de radiación solar; G_{ing} la radiación solar incidente sobre ellas; G_{stc} la radiación solar idónea; k el coeficiente de pérdida de potencia en función de la temperatura; T_C la temperatura de la placa fotovoltaica y T_R la temperatura de referencia

$$PP_v = PST_C * \frac{G_{ing}}{G_{stc}} * (1 + k(T_C - T_R)) \quad 5.1$$

El cálculo de la potencia generada por generadores eólicos se ha realizado con la ecuación 5.2 (Jenkins et al., 2000), que tiene en cuenta los siguientes parámetros: C_p coeficiente de potencia; ρ la densidad del aire (1.225kg/m³); V la velocidad del viento (m/s); A el área del rotor (m²).

$$PP_w = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 A \quad 5.2$$

En el caso, de plantas térmicas de generación de electricidad no es tan sencillo modelar la cantidad de energía eléctrica que se puede obtener en función de la radiación solar. Esto se debe, en parte, a la gran cantidad de sistemas de acumulación y aprovechamiento de calor para obtener electricidad. El trabajo



(Kalogirou, 2004) analiza los principales sistemas de aprovechamiento de energía térmica, la aplicación idónea de cada uno y el software específico que permite modelar instalaciones de energía termosolar, TRNSYS, WATSUN y POLYSUN. Con el fin de simplificar los cálculos, los datos de generación se calculan ponderando la potencia máxima de generación en función de la relación entre la temperatura óptima y la real.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



3. Entorno de prototipado *pSMADE*

El entorno de prototipado *pSMADE* permite representar una red o sistema eléctrico particular utilizando el framework desarrollado como modelo tecnológico *fdSMADE*. El uso del entorno de prototipado aporta una serie de ventajas que quedan resumidas:

- Abstrae el modelo tecnológico. Permite que coexistan varios modelos tecnológicos alternativos a *fdSMADE* en un único entorno de prototipado que facilita la obtención de soluciones para cada uno de los framework definidos en el modelo tecnológico. Ofrece la posibilidad de evaluar la solución obtenida para cada caso particular o bien elegir a priori para qué framework se quiere obtener la solución.
- Reduce el tiempo de diseño del problema a solucionar, gracias al uso de interfaces de tipo “What You See is What You Get” (WYSIWYG).
- Los usuarios no necesitan conocimientos de programación.
- Facilita la realización de simulaciones modificando parámetros relacionados con las estrategias de gestión de la distribución eléctrica.
- Permite incorporar funcionalidades que estén directamente relacionadas con el modelo tecnológico y/o con herramientas de terceros.

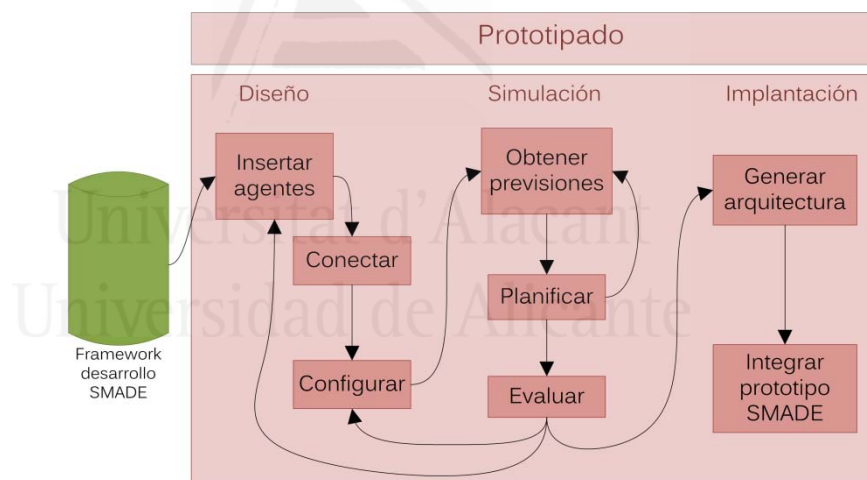


Figura 5.7 Diagrama de bloques con las tareas que componen el entorno de prototipado



Tal y como se introdujo en la de propuesta de solución del primer capítulo, el entorno de prototipado *pSMADÉ* abarca las etapas de *diseño*, *simulación* e *implantación*. Ver figura 5.7. Permite prototipar de forma cíclica evaluando la bondad de la distribución de energía eléctrica simulada, siendo posible, además de rectificar el diseño inicial mediante la modificación del valor de los parámetros que determinan el comportamiento de cada agente. Este enfoque es relevante, ya que al haber definido una estrategia de gestión de la distribución eléctrica global para cualquier caso particular de instalación eléctrica real, es conveniente ofrecer mecanismos de calibración/configuración del sistema multiagente que permita desarrollar un comportamiento específico que se adapte a las necesidades concretas de cada instalación. De esta forma se obtiene un mecanismo de prototipado ágil que permite refinar progresivamente el comportamiento del sistema multiagente de acuerdo a las necesidades de la instalación a gestionar.

El entorno de prototipado permite el diseño de sistemas multiagente recursivos mediante la creación de instancias del entorno de prototipado para cada uno de los niveles de abstracción, indicando en cada caso el agente que contendrá al sistema multiagente de cada nivel de abstracción. Las ventajas del uso de instancias del entorno de prototipado residen en la capacidad de realizar las acciones que permite el entorno, esencialmente simulaciones, de forma colectiva contemplando todos los niveles de abstracción, o por el contrario de forma individual y acotada a cada uno de los distintos subsistemas multiagente que componen al sistema multiagente completo.

3.1. Descripción de *pSMADÉ*

El aspecto que presenta el entorno de prototipado *pSMADÉ* se muestra en la figura 5.8. En ella se aprecian 4 zonas diferenciadas: la zona superior contiene el menú con las distintas acciones que el entorno permite realizar; la zona central, denominado área de diseño, permite diseñar la instalación eléctrica insertando y conectando instancias de las distintas clases de agentes; la zona inferior muestra los mensajes al usuario acerca del estado o de las acciones no permitidas; la zona derecha contiene un panel informativo subdividido, a su vez, en las siguientes 3 zonas: *agentes* muestra las instancias de cada clase de agentes definidos en el nivel de abstracción actual; *conexiones* muestra información acerca de las conexiones entrantes y salientes del agente que se encuentra seleccionado; y



propiedades muestra y permite modificar el valor de los parámetros que determinan el comportamiento del agente seleccionado. Dichos parámetros son los atributos definidos para cada clase de agente en el modelo estructural.

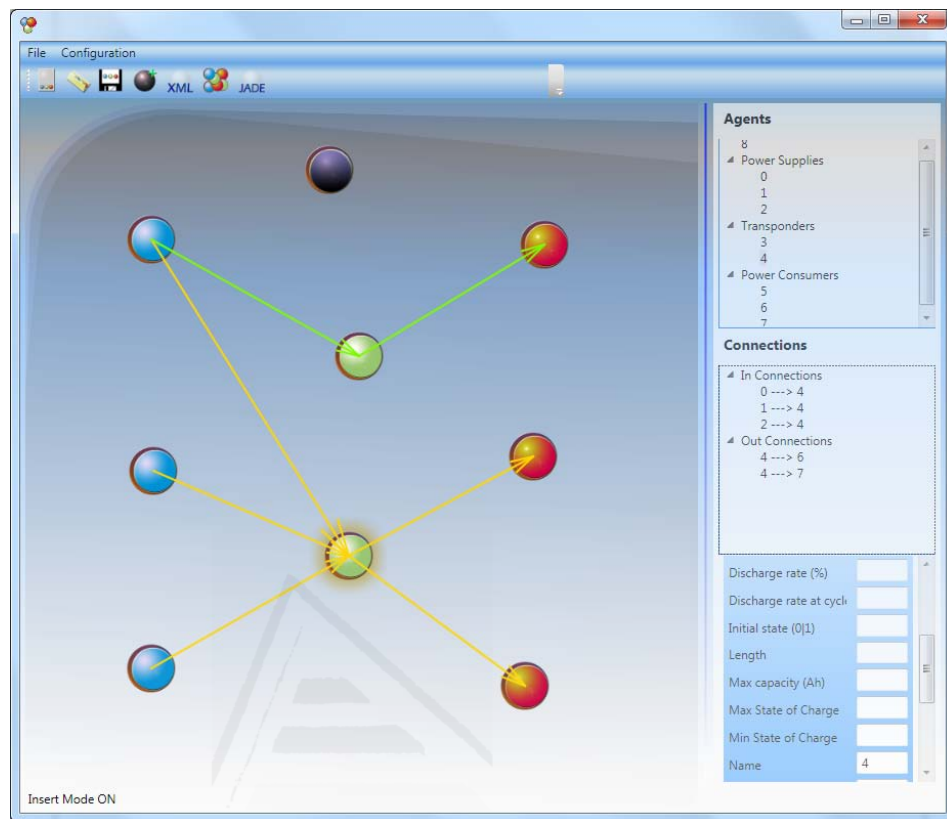


Figura 5.8 Aspecto del entorno de prototipado pSMADe

A la hora de diseñar una instalación eléctrica se deben crear las instancias de cada clase de agente, pulsando el botón izquierdo del ratón sobre el área de diseño se inserta un agente en dicha posición. Los agentes que todavía no han sido instanciados como fuentes, transpondedores o centros de consumo se representan de color morado. Si se pulsa el botón derecho del ratón sobre un agente que no ha sido instanciado, se puede seleccionar la clase de agente que va a instanciar. Tal y como se muestra en la tabla 5.2, los agentes de color azul representan a los agentes de tipo *F*, el verde a los agentes de tipo *T* y el rojo a los agentes *C*, definidos en el modelo estructural.







<i>pSMADE</i>	<i>fdSMADE</i>	Modelo Estructural
	AgenteBase	
	AgenteF	F
	AgenteT	T
	AgenteC	C

Tabla 5.2 Equivalencias entre los agentes que gestionan potencia eléctrica en pSMADE, fdSMADE y el modelo estructural

Al pulsar el botón izquierdo sobre un agente se selecciona dicho agente, resaltando en amarillo el contorno del agente y las conexiones tanto de entrada como de salida. Asimismo, el área de propiedades del agente muestra el valor de los atributos de dicho agente.

Las acciones que permite realizar el entorno quedan resumidas en la tabla 5.3. Entre ellas cabe destacar que a la hora de realizar el diseño de la instalación existen dos modos: modo insertar agentes, que permite añadir nuevos agentes a la instalación y el modo conectar agentes, que permite establecer conexiones lógicas entre los agentes. Las conexiones lógicas entre los agentes, representadas mediante flechas, indican las relaciones de producción o consumo entre cada par de agentes. Las flechas de entrada hacia un agente hacen referencia a que puede recibir energía eléctrica de los agentes que se encuentran en los otros extremos de la flechas. De forma análoga, las flechas de salida indican que el agente es capaz de suministrar energía eléctrica a los agentes situados en los otros extremos.

La acción crear un subsistema multiagente permite definir un nivel de abstracción menor para especificar la estructura de un agente compuesto por un sistema multiagente. De esta forma, se pueden definir sistemas multiagente



recursivos, donde se establecen diversos niveles de abstracción conforme los requerimientos del sistema gestor de la distribución eléctrica para dicha instalación. Para ello, se ha de seleccionar el agente y a continuación pulsar sobre el icono crear subsistema multiagente para que aparezca una nueva instancia del entorno de prototipado.

Icono	Acción
	Crear nuevo diseño
	Abrir diseño existente
	Guardar diseño
	Establecer modo insertar agentes
	Establecer modo conectar agentes
	Crear un subsistema multiagente
	Crea el fichero de descripción del diseño en XML
	Crea el sistema multiagente para el framework JADE utilizando <i>fdSMADÉ</i>

Tabla 5.3 Acciones asociadas a cada uno de los iconos del entorno de prototipado

La nueva instancia del entorno se diferencia de la anterior principalmente en: el título, que muestra el identificador del agente contenedor, es decir, el que contiene al sistema multiagente a diseñar, y en dos agentes que aparecen por defecto. Estos dos agentes representan respectivamente las conexiones de



entrada y de salida del agente contenedor, y que por lo tanto se denominan *agentes de suministro y consumo por defecto*. Estos dos agentes por defecto permiten vincular a los agentes que se inserten en este nivel con aquellos agentes del nivel de abstracción superior conectados al agente contenedor. Los agentes suministradores y consumidores por defecto se representan, tal y como muestra la figura 5.9, con los iconos utilizados para **AgenteF** y **AgenteC** ligeramente hundidos sobre el área de diseño. Además, en dicha figura se aprecia un posible diseño de sistema multiagente compuesto por tres instancias de **AgenteT** y una instancia de **AgenteF**. El agente de suministro por defecto alimenta a una instancia de **AgenteT** que a su vez está conectada a una segunda instancia que se encarga de proporcionar el suministro al agente de consumo por defecto. Adicionalmente, la instancia de **AgenteF** alimenta a la tercera instancia de **AgenteT**, que a su vez es capaz de suministrar al agente de consumo por defecto. Una vez finalizado el diseño del subsistema que compone al agente seleccionado de la figura 5.8, se puede cerrar la instancia del entorno de prototipado actual para volver a la instancia del nivel superior para continuar con el diseño.



Figura 5.9 Instancia del entorno de prototipado que permite diseñar el sistema multiagente albergado en el agente transpondedor 4



Una vez que se ha diseñado la instalación se puede generar el documento XML que representa dicho diseño y que contiene los datos para generar el sistema multiagente utilizando fdSMADe sobre JADE.

La última acción consiste en crear de forma automatizada el sistema multiagente, que permite simular el comportamiento de la instalación de acuerdo a las previsiones de potencia generada, consumida y el comportamiento de cada agente que determina las políticas de gestión eléctrica utilizadas. Para ello, es conveniente configurar de forma adecuada los parámetros relativos a: las regiones δ_i en las que cada agente se encuentra ubicado, y los agentes de simulación de potencia, optimización global, predicción meteorológica y la vinculación con fdSMADe.

3.1.1. Configuración

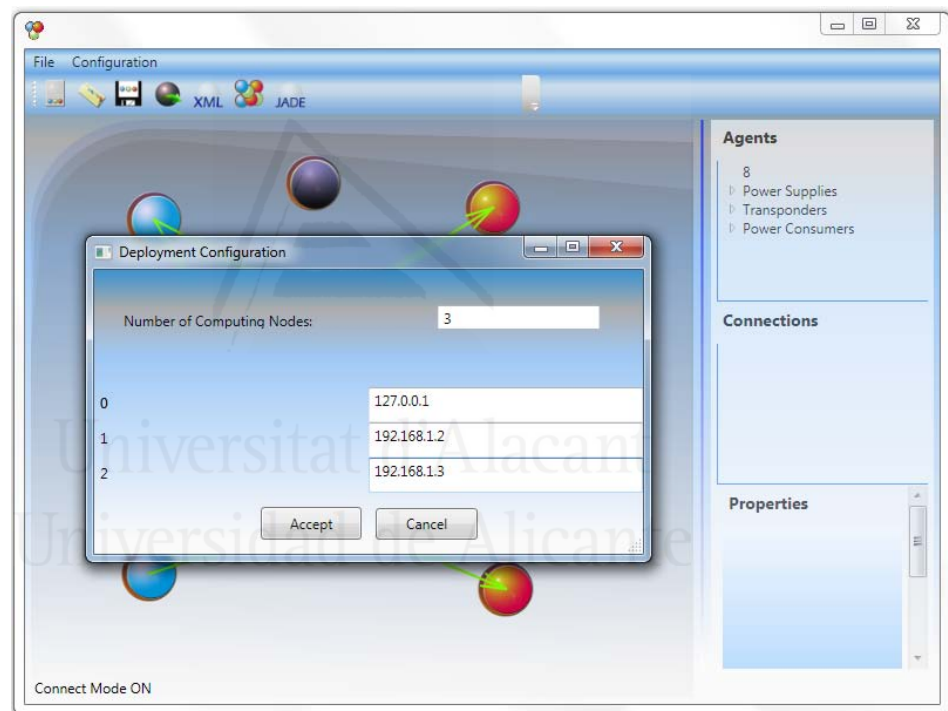


Figura 5.10 Formulario de configuración de los nodos de computación en los que se puede distribuir el sistema multiagente resultante



La configuración se realiza desde el menú *configuración* donde se puede seleccionar el aspecto concreto a configurar. La configuración permite modificar los aspectos relativos a las regiones que componen el entorno en el que los agentes se ubican. También permite configurar a los agentes que proporcionan servicios y la ruta del framework *fdSMADÉ*.

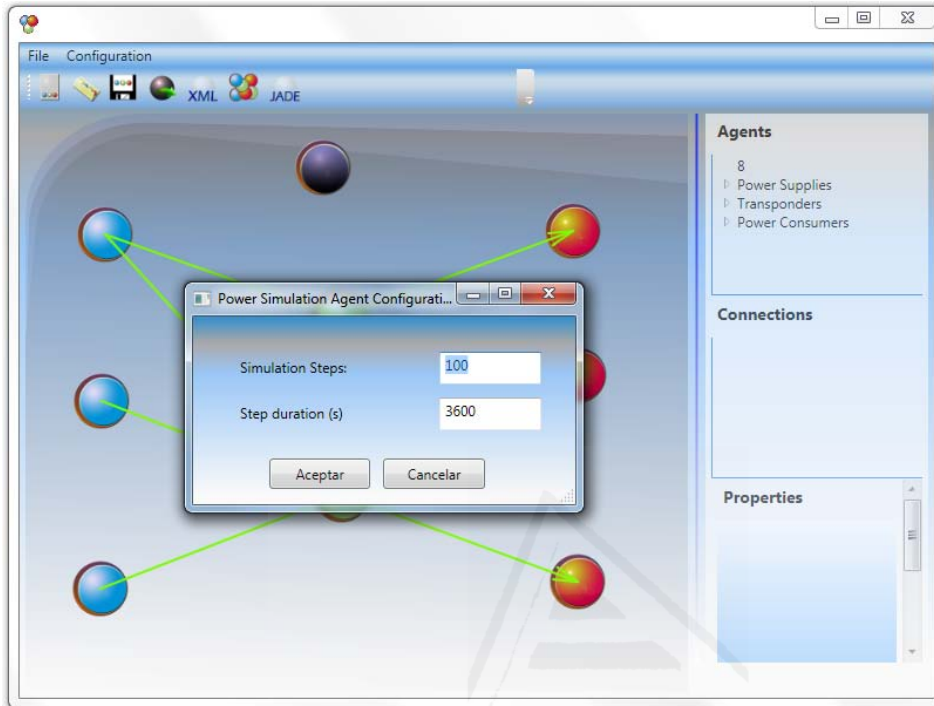


Figura 5.11 Formulario de configuración de los parámetros relativos al agente de simulación de potencia

El primer aspecto a tener en cuenta es el entorno, E , que no debe confundirse con el entorno que hace referencia a la herramienta de prototipado *pSMADÉ*. El entorno E se encuentra formado por el conjunto de regiones, $\Delta = \{\delta_1, \dots, \delta_n\}$, tal y como está definido en el modelo estructural y consecuentemente en *fdSMADÉ*. Cada una de esas regiones, δ_i , pueden ser representadas en el entorno de prototipado *pSMADÉ* mediante nodos de computación. Se establece una analogía entre las regiones donde los agentes están ubicados con los nodos de computación donde los agentes van a ser ejecutados y que por tanto tienen acceso a los datos ofrecidos por los dispositivos de entrada/salida de dicho computador. De esta forma, E puede ser considerado como el conjunto de nodos



de computación sobre los que se encuentra distribuido el framework JADE y el sistema multiagente diseñado. Para ello, el entorno de prototipado permite indicar el conjunto de nodos de computación, concretamente sus direcciones IP y posteriormente indicar a cada agente el nodo en el que va a ser ejecutado. Para conseguir esto, a cada uno de los agentes se les ha añadido un parámetro extra, denominado *nodo de computación* para indicar sobre cuál de los nodos de computación definidos se va a ejecutar. En el caso de que un agente esté compuesto por un sistema multiagente, por defecto dicho sistema multiagente hereda el nodo de computación del agente padre, aunque sigue siendo posible modificarlo con el fin de poder distribuir la carga de trabajo adecuadamente. El formulario de configuración donde se pueden añadir los nodos de computación se muestra en la figura 5.10, donde se indica el número de nodos y la dirección IP asociada a cada identificador de nodo. Dicho identificador es el que se le asigna posteriormente a cada agente.

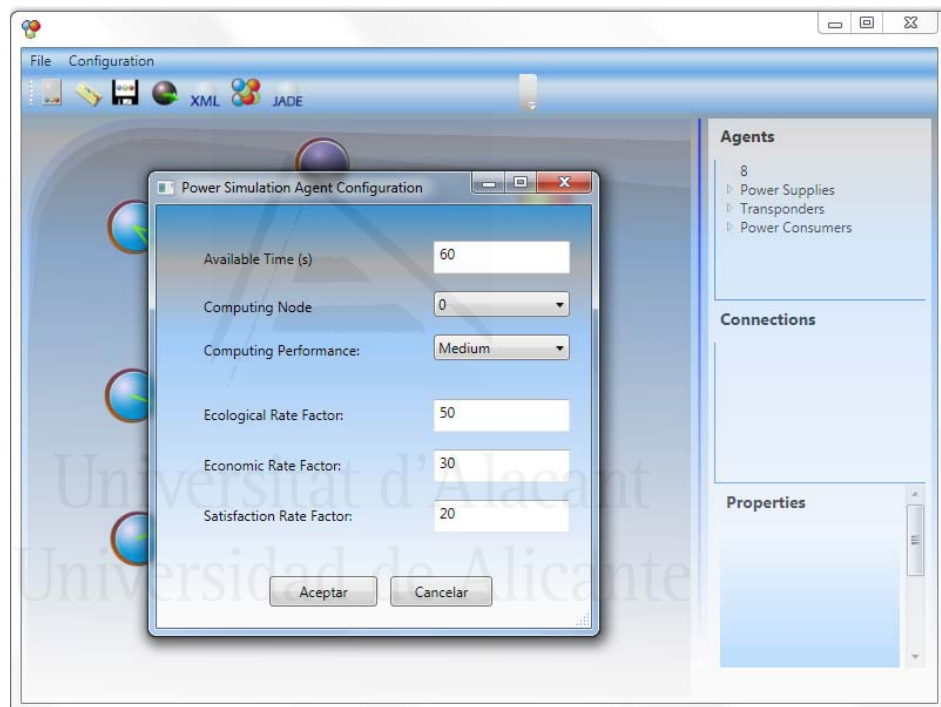


Figura 5.12 Formulario de configuración del agente de optimización global



Antes de simular el comportamiento del sistema, es conveniente dar valor a aquellos parámetros relativos al agente de simulación de potencia, concretamente a aquellos parámetros que definen al periodo de tiempo a simular. La figura 5.11 muestra el formulario de configuración que permite establecer el número de pasos de simulación y la duración en segundos de cada paso de simulación.

La configuración del agente de optimización global requiere varios parámetros que son utilizados para calcular la bondad de la solución que contiene la distribución energética. El formulario que permite dar valor a los parámetros se muestra en la figura 5.12. Entre los parámetros cabe destacar el tiempo disponible en segundos que dispone para mejorar la solución óptima local; el identificador del nodo de computación sobre el que se va a ejecutar; el rendimiento estimado de dicho nodo, siendo los posibles valores: bajo, medio y alto; y por último, cada uno de los factores de ponderación para los criterios ecológicos, económico y de satisfacción.

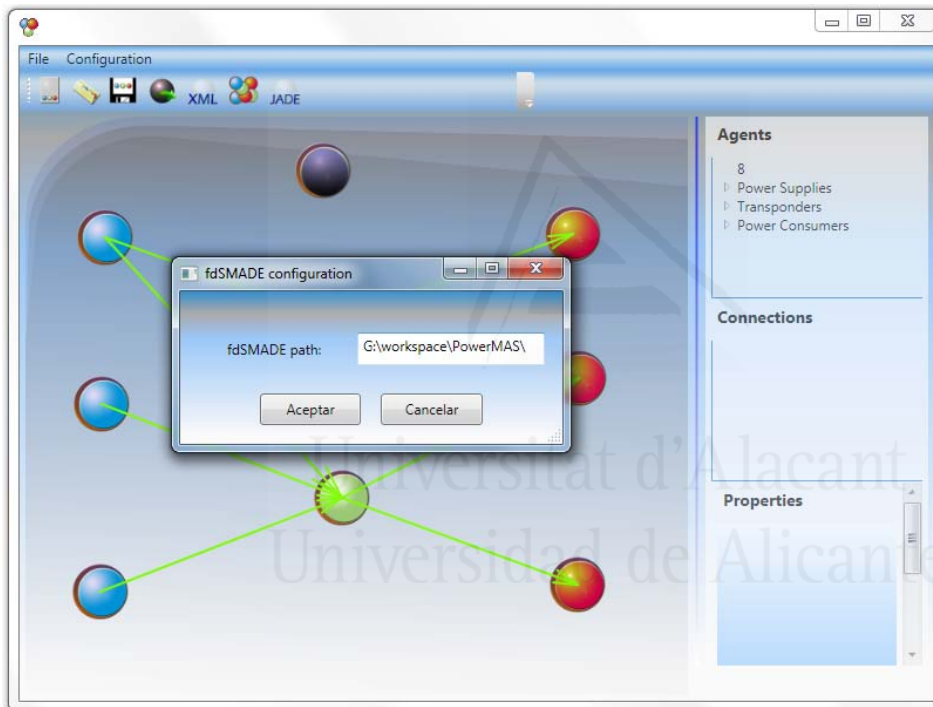


Figura 5.13 Formulario de configuración de la ruta donde se encuentra fdSMADe



Finalmente, es conveniente especificar la ruta donde se encuentra el framework *fdSMADe*. Aunque el entorno tiene la ubicación por defecto, es posible modificarla a través del formulario mostrado en la figura 5.13.

3.2. Integración de *pSMADe* y *fdSMADe*

El entorno de prototipado se concibe en un nivel de abstracción superior a *fdSMADe*, tal y como muestra la figura 5.14. Se aprecia la arquitectura de las capas obtenidas como resultado de aplicar la metodología FET y de las que se utilizan como base: la máquina virtual de java JVM y el framework .NET. Se puede observar que *pSMADe* está desarrollado sobre el framework .NET. La decisión de elegir una tecnología distinta de la utilizada para desarrollar *fdSMADe* otorga una mayor abstracción entre dichas capas reduciendo el acoplamiento de forma que es posible utilizar *fdSMADe* desde otras herramientas y entornos haciendo uso de la interfaz definida en *fdSMADe*. La interfaz de comunicación se ha definido a través de un documento XML, denominado *powersystem.xml*, que recoge la información introducida en el entorno de prototipado acerca de las instancias de cada una de las clases de agentes, las conexiones entre ellos y el valor de sus respectivos parámetros.

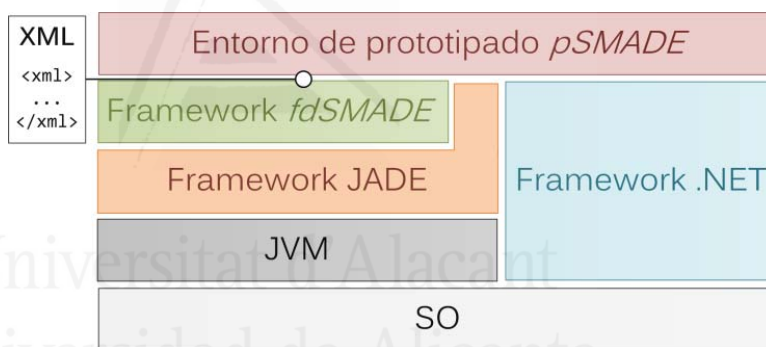


Figura 5.14 Arquitectura de capas que componen la propuesta de solución

Por la otra parte, *fdSMADe* requiere un punto de entrada que se encargue de procesar el documento *powersystem.xml* con el fin de crear los contenedores, las instancias apropiadas de cada clase de agente y les asigne los correspondientes valores a cada uno de sus parámetros. Ese punto de entrada lo constituye el propio framework JADE al que se le indica que ejecute un agente especial



denominado agente constructor, implementado por la clase `AgenteConstructor`, y el documento `powersystem.xml` a procesar. El agente constructor no ha sido especificado en los modelos funcional, estructural ni tecnológico debido a que la naturaleza de su cometido conceptualmente no es apropiada como para ser considerado un agente ya que únicamente facilita la lectura y procesamiento del documento XML. No requiere de los mecanismos de interacción entre agentes descritos en los capítulos anteriores ya que pese haber sido implementado como un agente, no responde a estímulos externos ni envía mensajes. No tiene asignado ningún comportamiento, si no que el agente procesa `powersystem.xml` en el método de configuración y hace las llamadas correspondientes para la creación de las instancias de agentes en sus respectivos contenedores. De hecho, podría haber sido implementado como un proceso externo al framework *fdSMADÉ* a través de la interfaz de línea de comandos que ofrece JADE. Finalmente, se ha implementado como un agente para facilitar la cohesión, distribución y utilización del framework. De esta forma para iniciar el framework *fdSMADÉ* sobre JADE, *pSMADÉ* ejecuta el comando mostrado en comando 5.1 para iniciar el framework JADE constituido por el contenedor principal. Dentro de dicho contenedor principal se crea una instancia del agente constructor que recibe como parámetro el documento XML con la descripción de la instalación. La opción `-classpath` indica que busque en la ruta `pathTofdSMADÉ/lib` ya que allí se encuentran ubicados los ficheros `jade.jar` y `common-codec-1.3.jar` que son necesarios para iniciar JADE; por su parte `pathTofdSMADÉ/bin` contiene la ruta a *fdSMADÉ* que contiene las clases que componen dicho framework; `jade.Boot` es la clase que inicia JADE; y `-gui` inicia la interfaz gráfica de JADE. Por defecto crea el contenedor principal en el nodo de computación en el que se ejecuta el comando, por lo que es denominado nodo de computación principal, utilizando el puerto 1099 para comunicarse con agentes ubicados en otros contenedores.

```
C:\> java -classpath pathTofdSMADÉ/lib;pathTofdSMADÉ/bin;
jade.Boot -gui
miConstructor:agents.AgenteConstructor("path/powersystem.xml")
```

*Comando 5.1 Inicia el framework JADE con un contenedor principal. Crea una instancia del agente constructor que crea el subconjunto de sistema multiagente que le corresponden a este nodo mediante *fdSMADÉ* en el nodo de computación en el que se ejecuta *pSMADÉ**



En el caso de que se hayan definido varios nodos de computación, se ha de realizar el despliegue del sistema multiagente, y para ello se ha de constituir la plataforma JADE en los diversos nodos de computación definidos. A continuación se consideran las principales dos alternativas a la hora de elegir la estructura de la plataforma JADE.

Una plataforma de agentes independiente por cada nodo de computación, estando compuesta por un contenedor principal cada una. En este esquema es posible que agentes en distintas plataformas se comuniquen, pero evita la migración de agentes de una plataforma a otra. Además, conceptualmente la equivalencia de nodo de computación – plataforma impone un alto grado de desacoplamiento por entre los agentes, por lo que puede no ser conveniente cuando es plausible que se den un alto número de interacciones entre agentes alojados en diversos nodos de computación.

La segunda alternativa consiste en crear una única plataforma y que dicha plataforma esté compuesta por tantos contenedores como nodos de computación se hayan definido. En este caso, se establece una equivalencia entre nodo de computación – contenedor, de forma que se relaja el desacoplamiento, ya que todos los agentes, independientemente del nodo en el que estén alojados, pertenecen a la misma plataforma. En este caso, es posible migrar agentes de un contenedor a otro y consecuentemente entre nodos de computación. Conforme a la naturaleza de los sistemas que van a ser representados, es conveniente elegir este tipo de arquitectura, ya que no penaliza las interacciones entre los agentes ubicados en distintos nodos de computación.

Utilizando la estructura basada en una única plataforma compuesta por tantos contenedores como nodos de computación hayan sido definidos. El contenedor principal de la plataforma se crea en el nodo de computación en el que se ejecuta el entorno de prototipado *pSMADÉ*. Esta acción es posible realizarla de forma automatizada, mediante el comando definido en comando 5.1. En cambio, se ha de crear un contenedor periférico para cada uno de los nodos de computación definidos y en cada uno lanzar los agentes correspondientes. En principio, sería conveniente poder crear los contenedores de forma dinámica desde el nodo de computación principal, es decir, el que implementa el contenedor principal de la plataforma JADE, pero no es posible de forma nativa. A continuación se enumeran algunas de las principales alternativas a la hora de realizar el despliegue automatizado desde el nodo de computación principal



partiendo de la base de que en cada nodo de computación se encuentra instalado el framework JADE y *fdSMADE*.

La primera opción consiste en copiar el documento de descripción de la instalación *powersystem.xml* para ejecutar el comando mostrado en comando 5.2 desde el nodo de computación principal en el resto de nodos de computación. Esto conviene realizarlo de forma semiautomatizada mediante la utilización de protocolos y programas de tipo SSH que permiten, entre otras cosas, copiar el fichero de configuración y lanzar el comando 5.2 al intérprete de comandos. El comando presenta las siguientes opciones: *-container*, que indica que se cree un contenedor periférico y *-host ipNodoComputaciónPrincipal* que indica el nombre o la dirección ip del nodo de computación que contiene el contenedor principal al que se ha de vincular. Por defecto busca el contenedor principal en el puerto 1099.

```
C:\> java -classpath pathTofdSMADE/lib;pathTofdSMADE/bin;
jade.Boot -container -host ipNodoComputaciónPrincipal
miConstructor:agents.AgenteConstructor("path/powersystem.xml")
```

Comando 5.2 Inicia el framework JADE y crea un contenedor periférico que se asocia al contenedor principal especificado en el parámetro host. Crea instancia del agente constructor que construye el subconjunto de agentes que le corresponden a partir de fdSMADE

La segunda alternativa consiste en utilizar el entorno para el desarrollo de agentes y flujo de trabajo WADE (Giovanni et al., 2008). Dicho entorno es una extensión de JADE que permite la ejecución de tareas de acuerdo a los flujos de trabajo definidos e introduce mecanismos que ayudan a reducir la complejidad de gestionar la distribución, concretamente en la administración y la tolerancia a fallos. Entre las funcionalidades que ofrece el entorno se encuentra la distribución y gestión remota de contenedores y de los respectivos agentes que habitan en cada uno. A priori, puede parecer conveniente utilizar WADE, ya que permite de forma nativa distribuir las instancias de agentes definidas en sus respectivos nodos de computación de forma automatizada, pero se descarta su uso en este escenario debido a que WADE está orientado a la ejecución de flujos de trabajo, gestión integral y tolerancia a fallos. Es decir, la mayor parte de funciones que ofrece no son requeridas, por lo que resulta más coherente elegir la primera alternativa, que se acopla perfectamente a las necesidades.



3.3. Simulación

Una vez que los agentes han sido creados en sus respectivos nodos de computación, el agente de simulación de potencia se encarga de iniciar cada paso de la simulación. Al finalizar cada paso de la simulación, el estado de cada agente es recogido por el agente de simulación de potencia, de forma que al finalizar todos los pasos de simulación, procede a escribir ficheros de texto separados por comas (CSV) con la evolución del estado de cada agente. De esta forma, es posible analizar individual y globalmente la evolución del sistema multiagente, determinando en cada paso: la energía suministrada y/o recibida, así como los destinatarios y/o receptores de dicha energía y aquellos agentes que han reducido su consumo con el fin de potenciar la autonomía del sistema.

El análisis de los documentos CSV puede realizarse mediante hojas de cálculo que permiten obtener de forma automatizada datos elaborados y gráficas que muestran el comportamiento de cada agente. Los principales tipos de gráficas están orientadas a mostrar:

- Por cada nivel de abstracción definido. La evolución de la potencia suministrada y consumida considerando el nivel de abstracción al completo.
- Por cada instancia de **AgenteF**. La evolución de la potencia simulada que es capaz de suministrar y la que finalmente ha suministrado a cada uno de las instancias de **AgenteT** y **AgenteC**.
- Por cada instancia de **AgenteC**. La evolución de la potencia requerida y que finalmente ha obtenido de cada uno de las instancias de **AgenteF** y **AgenteT**, indicando los periodos de tiempo en los que ha tenido que reducir el consumo.
- Por cada instancia de **AgenteT**. En el caso de que se trate de un medio de almacenamiento muestra la evolución del estado de carga así como la energía suministrada y consumida por las instancias de **AgenteF** y **AgenteC** respectivamente. En el caso de que represente una línea de transmisión o un convertidor de potencia se muestra la energía disipada por dicho elemento.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación conviene analizarlos para determinar y evaluar la idoneidad de la solución diseñada. En el caso de que los resultados no sean satisfactorios, se puede volver a la etapa de diseño para modificar los valores de algunos parámetros de los agentes con el fin de configurar las políticas de gestión de la distribución eléctrica o incluso se puede



llegar al extremo de rediseñar el sistema multiagente insertando o eliminando instancias de agentes. De esta forma se puede simular el comportamiento de las nuevas soluciones que se vayan obteniendo hasta obtener resultados satisfactorios.

3.4. Implantación

La fase de implantación está considerada dentro de la metodología y es utilizada consecuentemente en el entorno *pSMADÉ*. No obstante, su cometido queda fuera del presente trabajo, ya que la implantación del sistema multiagente requiere utilizar interfaces de comunicación ad-hoc entre cada agente con su respectivo dispositivo a manejar. Aunque bien es posible definir el conjunto de interfaces de comunicación más comunes y aquellos protocolos más extendidos, de forma que se le indique a cada agente como se va a comunicar con su respectivo dispositivo físico y real. Esta opción no permite dar cobertura a la gran cantidad de dispositivos que existen en el mercado. Por lo que esta opción no parece la más adecuada si se persigue la universalidad de las soluciones obtenidas.

Aunque existen trabajos como (Romero et al., 2010), (Messer et al., 2006) y (Kyeong-Deok et al., 2005), tecnologías y protocolos como UPnP (UPnP_Forum, 2011) y OSGi (Haitao et al., 2005) que facilitan la comunicación entre distintos dispositivos. A excepción de UPnP, cuyos dispositivos se comunican de forma directa y que está orientado al ámbito del hogar, el resto de soluciones utilizan un elemento middleware capaz de comunicarse con todos los dispositivos. En el caso que nos ocupa, el elemento middleware ha de ser capaz de comunicarse con el sistema multiagente y de enviar las respectivas órdenes y recibir datos de cada uno de los dispositivos a gestionar. De esta forma dicho elemento middleware establece la analogía entre las acciones que el agente quiere realizar y el protocolo de comunicación que es capaz de interpretar cada dispositivo físico. El elemento middleware, se puede particularizar en controladores lógicos programables (PLC), ya que pueden estar distribuidos y son lo suficientemente robustos como para ser utilizados en entornos industriales. El trabajo descrito en (Valdivieso-Sarabia et al., 2010) gestiona un sistema de climatización basado en suelo radiante y alimentado por diversas fuentes de energía renovables que integra diversas tecnologías como KNX (Praus et al., 2006), EnOcean (Körber et al.,



2005), sondas de temperatura PT-100, bombas de circulación, etc. En este caso, se utilizan dos PLC que actúan como middleware distribuido ya que es capaz de comunicarse con los diversos dispositivos a través de los módulos correspondientes a cada tecnología y/o protocolo.

La utilización de PLC como middleware de comunicación entre diversas tecnologías y protocolos basado en PLC implica utilizar dispositivos altamente versátiles y potentes que tienen un coste económico a tener en cuenta, sobre todo si va estar infrautilizado. Además, aunque los PLC pueden estar distribuidos, debido a su tamaño, capacidad de cómputo y coste se puede conseguir un grado de distribución medio, de forma que cada PLC contenga a un conjunto de agentes que se comuniquen con varios dispositivos. Esto en función de la instalación real a manejar, puede suponer que se tengan que ubicar los PLC en zonas intermedias, lo que repercute en el cableado a realizar. Con el fin de potenciar la versatilidad para que se adapte a las necesidades de la instalación real a gestionar, la evolución del middleware basado en PLC para la comunicación del sistema multiagente con los dispositivos reales, está recogida en la patente P201101361. Esta evolución establece una familia de dispositivos que permite realizar instalaciones con un alto grado de distribución, pudiendo incluso llegar a utilizar sistemas embebidos de baja capacidad de cómputo, siempre y cuando sean capaces de ejecutar una máquina virtual de Java. Esto supone que se puedan ubicar cerca del dispositivo real a gestionar, reduciendo el cableado necesario. Para realizar su cometido los dispositivos embebidos requieren varias interfaces de comunicación. La primera de ellas TCP/IP ya sea cableada o inalámbrica para permitir la comunicación entre agentes. La segunda se corresponde con el protocolo concreto que admite el dispositivo real. De esta forma, se establece una familia de sistemas embebidos en los que cada uno es capaz de comunicarse con un tipo determinado de dispositivos reales.

Por lo tanto, aunque la etapa de implantación está contemplada en el entorno de prototipado, no está totalmente automatizada, y permite integrar el sistema multiagente obtenido de *pSMADÉ* en entornos controlados mediante PLC y siendo posible su integración en dispositivos de computación portables de potencia limitada.



Referencias

- (AEMET, 2013) AEMET (2013) Agencia Estatal de Meteorología. Gobierno de España.
- (Bellifemine et al., 2010) Bellifemine, F., Caire, C., Trucco, T. and Rimassa, G. (2010) JADE Programmer's guide. Telecom Italia S.p.A.
- (Bellifemine et al., 2001) Bellifemine, F., Poggi, A. and Rimassa, G. (2001) Developing multi-agent systems with a FIPA-compliant agent framework. *Softw. Pract. Exper.*, 31, 103-128.
- (Bratman, 1987) Bratman, M. (1987) *Intention, Plans, and Practical Reason*, Harvard University Press.
- (Braubach et al., 2005) Braubach, L., Pokahr, A., Lamersdorf, W., Unland, R., Calisti, M. and Klusch, M. (2005) Jadex: A BDI-Agent System Combining Middleware and Reasoning. Software Agent-Based Applications, Platforms and Development Kits. IN Walliser, M., Brantschen, S., Calisti, M. and Hempfling, T. (Eds.). Birkhäuser Basel.
- (Camacho et al., 2002) Camacho, D., Aler, R., Castro, C. and Molina, J. M. (2002) Performance evaluation of ZEUS, Jade, and SkeletonAgent frameworks. *Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference on*.
- (d'Inverno et al., 1997) d'Inverno, M., Kinny, D., Luck, M. and Wooldridge, M. (1997) A formal specification of dMARS. *Intelligent Agents IV*, 1365, 155–176.



- (Faisal, 2008) Faisal, A. M. (2008) Microgrid modelling and online management. Technology Control Engineering , Helsinki, University of Helsinki.
- (Giovanni et al., 2008) Giovanni, C., Danilo, G. and Massimo, B. (2008) WADE: a software platform to develop mission critical applications exploiting agents and workflows. *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: industrial track*. Estoril, Portugal, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems.
- (Gómez-Sanz et al., 2010) Gómez-Sanz, J. J., Fernández, C. R. and Arroyo, J. (2010) Model driven development and simulations with the INGENIAS agent framework. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18, 1468-1482.
- (Gutknecht et al., 2001) Gutknecht, O., Ferber, J. and Michel, F. (2001) Integrating tools and infrastructures for generic multi-agent systems. *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*. Montreal, Quebec, Canada, ACM.
- (Haitao et al., 2005) Haitao, Z., Fei-Yue, W. and Yunfeng, A. (2005) An OSGi and agent based control system architecture for smart home. *Networking, Sensing and Control, 2005. Proceedings. 2005 IEEE*.
- (Helsingier and Wright, 2005) Helsingier, A. and Wright, T. (2005) Cougaar: A Robust Configurable Multi Agent Platform. *Aerospace Conference, 2005 IEEE*.
- (Howden et al., 2001) Howden, N., Rönquist, R., Hodgson, A. and Lucas, A. (2001) JACK Intelligent Agents-Summary of an Agent Infrastructure. *Proc.of the 5th ACM Int.Conf. on Autonomous Agents*.
- (Jenkins et al., 2000) Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D. and Strbac, G. (2000) *Embedded Generation*, Institution of Electrical Engineers. 9780852967744.



- (Kalogirou, 2004) Kalogirou, S. A. (2004) Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 231-295.
- (Körber et al., 2005) Körber, H., Wattar, H., Scholl, G. and Heller, W. (2005) Embedding a Microchip PIC18F452 based commercial platform into TinyOS. *Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks (REALWSN'05)*.
- (Kyeong-Deok et al., 2005) Kyeong-Deok, M., Young-Hee, L., Chang-Eun, L. and Young-Sung, S. (2005) Design of a universal middleware bridge for device interoperability in heterogeneous home network middleware. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 51, 314-318.
- (Lange and Mitsuru, 1998) Lange, D. B. and Mitsuru, O. (1998) *Programming and Deploying Java Mobile Agents Aglets*, Boston, MA, USA, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. . 0201325829.
- (Leszczyna, 2004) Leszczyna, R. (2004) Evaluation of agent platforms. Technical report, European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen.
- (Leszczyna, 2008) Leszczyna, R. (2008) Evaluation of agent platforms (ver 2.0). Technical report, European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen.
- (Lucena et al., 2004) Lucena, C., Garcia, A., Romanovsky, A., Castro, J., Alencar, P. C., Gorton, I., Haack, J., McGee, D., Cowell, A., Kuchar, O. and Thomson, J. (2004) Evaluating Agent Architectures: Cougaar, Aglets and AAA. *Software Engineering for Multi-Agent Systems II*. Springer Berlin Heidelberg.
- (Messer et al., 2006) Messer, A., Kunjithapatham, A., Sheshagiri, M., Song, H., Kumar, P., Nguyen, P. and Kyoung Hoon, Y. (2006) InterPlay: a middleware for seamless device integration and task orchestration in a networked home. *Pervasive Computing and Communications, 2006. PerCom 2006. Fourth Annual IEEE International Conference on*.



- (Moreno et al., 2003) Moreno, A., Valls, A. and Viejo, A. (2003) Using JADE-LEAP to implement agents in mobile devices <http://jade.tilab.com/papers/EXP/02Moreno.pdf> Last access on 23/05/2012
- (Mulet et al., 2006) Mulet, L., Such, J. M. and Alberola, J. M. (2006) Performance evaluation of open-source multiagent platforms. *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. Hakodate, Japan, ACM.
- (Nguyen et al., 2002) Nguyen, T., Dang, T. T., Hluchy, L., Laclavik, M., Balogh, Z. and Budinska, I. (2002) Agent Platform Evaluation and Comparison Institute of Informatics, Slovak Academy of Sciences.
- (Nwana et al., 1999) Nwana, H. S., Ndumu, D. T., Lee, L. C. and Collis, J. C. (1999) Zeus: A toolkit for building distributed multiagent systems. *Applied Artificial Intelligence*, 13, 129-185.
- (OpenSolarDB, 2010) OpenSolarDB (2010) OpenSolarDB <http://www.opensolardb.org/> Last access on 12/07/2012.
- (Pokahr et al., 2005) Pokahr, A., Braubach, L., Lamersdorf, W., Bordini, R., Dastani, M., Dix, J. r. and Fallah Seghrouchni, A. (2005) Jadex: A BDI Reasoning Engine. Multi-Agent Programming. IN Weiss, G. (Ed.). Springer US.
- (Praus et al., 2006) Praus, F., Kastner, W. and Neugschwandtner, G. (2006) A versatile networked embedded platform for KNX/EIB. *KNX Scientific Conference 2006*.
- (Ribeiro et al., 2011) Ribeiro, L., Candido, G., Barata, J., Schuetz, S. and Hofmann, A. (2011) IT support of mechatronic networks: A brief survey. *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*.
- (Ricordel et al., 2000) Ricordel, P.-M., Demazeau, Y., Omicini, A., Tolksdorf, R. and Zambonelli, F. (2000) From Analysis to Deployment: A Multi-agent Platform



Survey. Engineering Societies in the Agents World. Springer Berlin / Heidelberg.

(Romero et al., 2010) Romero, D., Hermosillo, G., Taherkordi, A., Nzekwa, R., Rouvoy, R., Eliassen, F. and Kapitza, R. (2010) RESTful Integration of Heterogeneous Devices in Pervasive Environments. Distributed Applications and Interoperable Systems. Springer Berlin / Heidelberg.

(Sycara et al., 1996) Sycara, K., Pannu, A., Williamson, M., Dajun, Z. and Decker, K. (1996) Distributed intelligent agents. *IEEE Expert*, 11, 36-46.

(UPnP_Forum, 2011) UPnP_Forum (2011) UPnP® Technologies for the smart grid-enabled home. http://upnp.org/resources/whitepapers/UPnP%20SmartGrid%20Whitepaper_November%202011.pdf Last access on 18/07/2012.

(Valdivieso-Sarabia et al., 2010) Valdivieso-Sarabia, R. J., García-Chamizo, J. M., Ferrández-Pastor, F. J. and Flórez-Revuelta, F. (2010) Sistema de climatización por suelo radiante coalimentado por energías renovables. *VIII Jornadas de aplicaciones y transferencia tecnológica de la inteligencia artificial, TTIA 2010 (AEPIA)*. Valencia, Print House.

(Weyns et al., 2005) Weyns, D., Parunak, H. V., Michel, F., Holvoet, T. and Ferber, J. (2005) Environments for Multiagent Systems, State-of-the-Art and Research Challenges. *Post-proceedings of the First International Workshop on Environments for Multiagent Systems*.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Capítulo seis

Casos de Estudio

El capítulo abarca el análisis de dos casos de estudio de distinta naturaleza con el fin de validar tanto el modelo estructural como el modelo tecnológico fdSMADe, haciendo uso del entorno de prototipado pSMADe. Con el propósito de determinar la generalidad de la propuesta en distintos ámbitos, se han elegido dos casos de estudio antagónicos. El primero se centra en la red de distribución eléctrica de una ciudad tipo, mientras que el segundo hace lo propio con un dispositivo electrónico portable, concretamente un ordenador portátil. Para cada uno de ellos se detallan las características propias, se simulan las condiciones tanto de generación como de consumo y se crea el correspondiente sistema multiagente a partir de fdSMADe y se analizan los datos de la distribución eléctrica obtenidos.



1. Introducción

El presente capítulo detalla la experimentación realizada utilizando el entorno de prototipado *pSMADÉ* que a su vez hace uso del el modelo tecnológico *fdSMADÉ*, ambos descritos en el capítulo anterior. La experimentación consiste en definir un caso de estudio, concretamente el sistema eléctrico a gestionar para optimizar la distribución de la potencia eléctrica en función de los criterios de optimización definidos para cada agente.

Residencial	Industrial	Ocio/Servicios
Redes de interconexión internacional		
Redes de transporte nacionales		
Redes de distribución		
Barrios	Polígonos industriales	Centros de ocio/ servicios
Edificios		
Viviendas residenciales	Empresas	Departamentos
Vehículos		
Robótica móvil		
Electrodomésticos	Maquinaria	Aparatos eléctricos
Aparatos electrónicos ubicados		
Aparatos electrónicos portables		

Tabla 6.1 Casos de estudio tipo en función del contexto sobre los que la propuesta de solución puede ser aplicada



Existen una gran variedad de casos de estudio tipo sobre los que la solución propuesta puede ser aplicada. La tabla 6.1 recoge dichos casos de estudio tipo en función de la magnitud del sistema eléctrico a gestionar y del contexto de aplicación. Se definen los contextos residencial, industrial y ocio/servicios a la hora de clasificar los tipos de subsistemas que pueden ser gestionados. Independientemente del contexto, se puede diferenciar de mayor a menor magnitud las redes de interconexión eléctrica de países, redes de transporte nacional, y las redes de distribución eléctrica. El nivel siguiente se diferencia en función del contexto por lo que aparecen barrios residenciales, polígonos industriales y centros de ocio/servicios que engloban a hospitales, universidades, institutos, colegios, centros deportivos, etc. El siguiente nivel es común y está formado por los edificios que los componen. A su vez, en función del contexto los edificios se componen por viviendas residenciales, empresas y departamentos. Los siguientes niveles, que son compartidos, están compuestos por: vehículos de transporte y entidades robóticas móviles. El próximo nivel diferencia explícitamente entre los contextos, por lo que se distinguen electrodomésticos, maquinaria y aparatos eléctricos. En cambio, los dos últimos niveles, que son comunes a todos los contextos, son dispositivos electrónicos ubicados y dispositivos electrónicos portables.

El caso de estudio elegido pretende ser representativo, en mayor o menor medida de todos ellos, ya que considera un sistema eléctrico heterogéneo que puede ser descompuesto en varios niveles de abstracción, siendo cada uno de ellos un tipo de caso de estudio distinto. Por lo que, un único caso de estudio puede ser alternativamente considerado como varios tipos de casos de estudio independientes, estando relacionados en función del nivel de abstracción sobre el que se centre la atención.

El problema se centra en optimizar el flujo eléctrico en una hipotética red de distribución metropolitana tipo. El caso de la red de distribución en una ciudad es, en sí, representativo de los problemas de optimización del flujo eléctrico en redes tanto de transporte como de distribución. Una vez distribuida la energía eléctrica hasta los destinatarios de la ciudad, el siguiente nivel estaría constituido por los barrios, polígonos industriales y grandes complejos que la forman. Pero debido a que su naturaleza es similar a la de la ciudad, aunque a menor escala, resulta conveniente utilizar otro caso de estudio más característico. Una vivienda residencial. Por lo tanto, el segundo nivel de abstracción está formado por una vivienda residencial, concebida como un subsistema subordinado de la ciudad. El



caso de la vivienda residencial no se desarrolla en el presente documento, debido a que se encuentra publicado (Valdivieso-Sarabia and Garcia-Chamizo, 2012). El siguiente nivel de abstracción pretende centrarse en los dispositivos electrónicos portables, concretamente en un ordenador portátil, ya que al ser portable ofrece un nuevo conjunto de situaciones de estudio propias de los dispositivos portables.

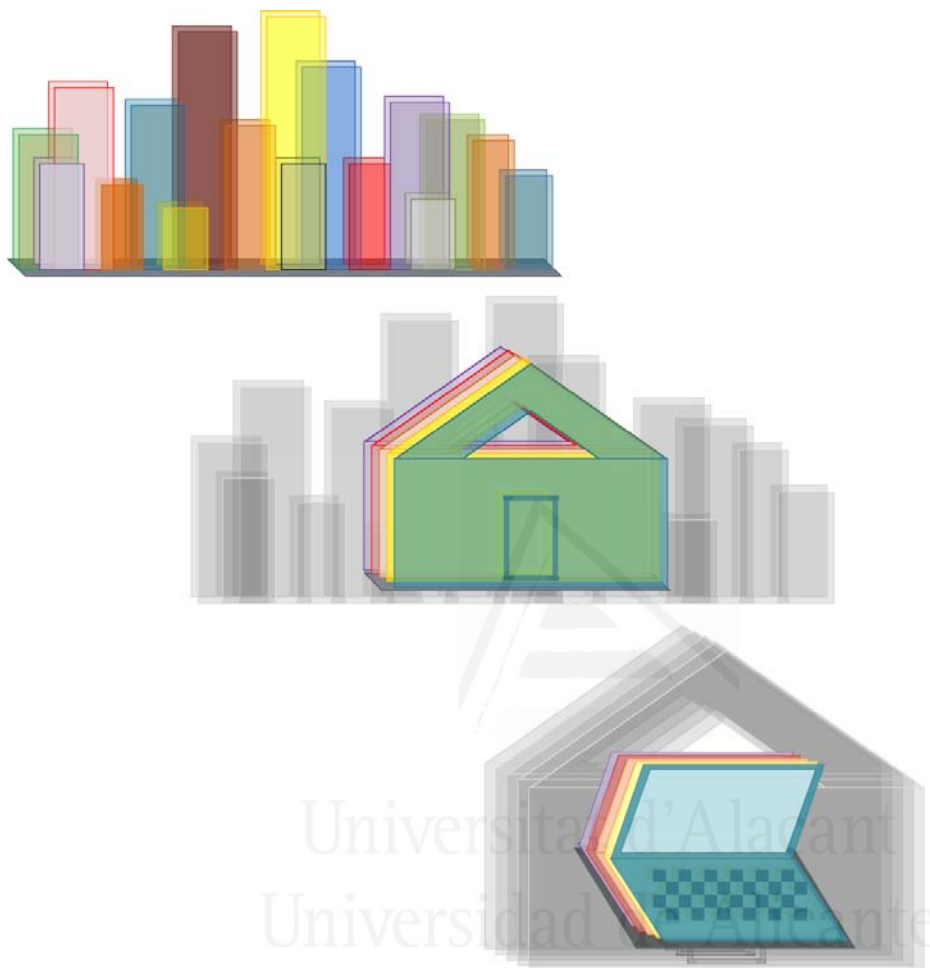


Figura 6.1 Niveles de abstracción jerárquicos cuyos elementos representativos son ciudad, vivienda y ordenador portátil

El caso de estudio ilustrado por la figura 6.1 muestra una visión integral de una red eléctrica de una ciudad, que integra el caso particular de una vivienda residencial y que a su vez contiene un ordenador portátil. En las siguientes



secciones se detallan los niveles de la red metropolitana y del ordenador portátil. La red metropolitana por ser la que representa a uno de los niveles de abstracción de mayor magnitud, y el portátil por ser todo lo contrario uno de los niveles de abstracción de menor magnitud.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



2. Red de distribución metropolitana

El primer nivel del caso de estudio lo constituye la red de distribución que se encarga de hacer llegar la energía eléctrica desde la red de transporte o incluso desde las plantas generadoras conectadas directamente a la red de distribución hasta los destinatarios finales, en este caso una ciudad.

La concepción clásica de las redes distingue entre redes distribución y transporte. Las principales diferencias están recogidas en (Ackermann and Knyazkin, 2002). En primer lugar diferencia el propósito, ya que las redes de distribución no están diseñadas para conectar directamente plantas de generación y además su diseño suele ser radial y no en forma de malla como sucede con las de transmisión. Esto implica que el flujo eléctrico en las redes de distribución suele ser unidireccional y que no suelen existir mecanismos redundantes. En segundo lugar, el efecto que produce la resistencia del cableado eléctrico sobre la tensión es bajo. Los consumidores de baja tensión normalmente no están gestionados por los correspondientes sistemas automáticos de monitorización y control, debido en parte a que la obtención y procesamiento de los datos no es trivial.

El enfoque tradicional está orientado a ubicar un número reducido de plantas de generación de energía eléctrica de gran potencia lejos de los centros de consumo. De esta forma se necesitan utilizar redes de transporte, que utilizan altas tensiones, así como las subestaciones de transformación, para enviar la electricidad hasta las redes de distribución que están ubicadas cerca de los consumidores finales. Los sistemas de gestión de monitorización y control del flujo eléctrico están orientados a gestionar el envío a través de la red de transporte, ya que existen caminos redundantes y en función del estado en que se encuentre la red, conviene utilizar unos caminos u otros. En cambio, una vez que la energía llega a la red de distribución, se reducen parcialmente los mecanismos de gestión automatizada, lo que evita que se optimice la distribución conforme al estado del núcleo urbano en el que se vaya a consumir.

A medida que se ha aumentado el interés por acercar las plantas de generación de energía eléctrica a los centros de consumo y reducir su potencia nominal, ha tomado relevancia el término conocido como generación distribuida (Jenkins et al., 2000). Este modelo permite que las plantas de generación se



conecten de forma directa a la red de distribución, aunque algunos autores consideran que se pueden conectar directamente a las redes de transmisión, y que consecuentemente se aproximen a los consumidores finales. La mayoría de autores suelen asociar el uso de fuentes de energía de una determinada potencia máxima, (Pepermans et al., 2005) identifica este valor en función de decenas de MW, 30MW o entre 50 y 100MW. (Ackermann et al., 2001) identifica los aspectos destacados en las definiciones realizadas por los principales autores: propósito, ubicación, capacidad de generación, área de suministro, tecnología de generación, impacto medioambiental, modo de operación, propiedad y grado de penetración. Entre ellos, únicamente considera relevantes el propósito y la ubicación, por lo que define la generación distribuida como “una planta de generación de potencia eléctrica conectada directamente a la red de distribución o en el cliente final”. Además, indica que a menudo se asocian las fuentes de energía renovables con los esquemas de generación distribuida.

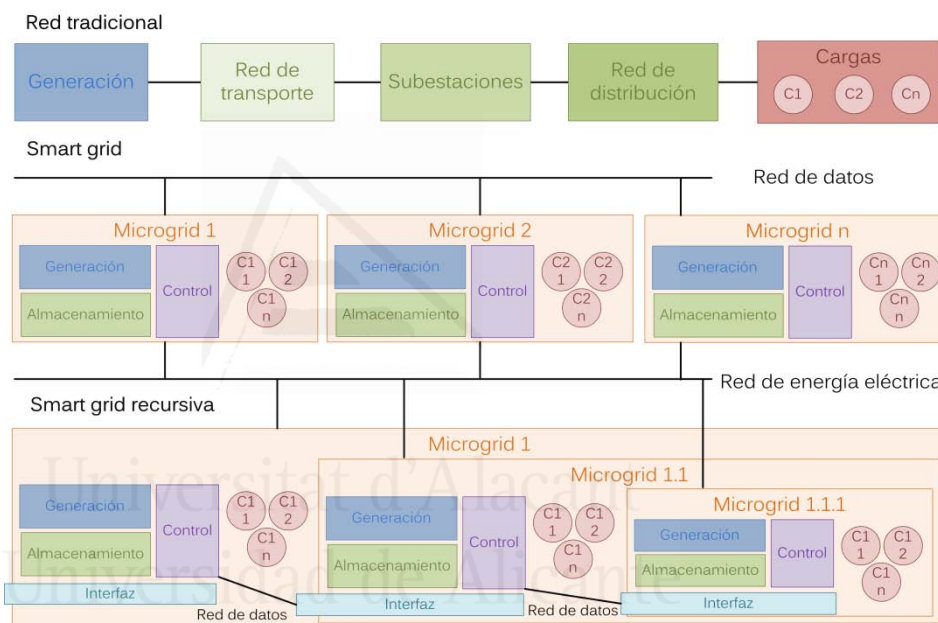


Figura 6.2 Topología de las redes de transmisión de energía eléctrica tradicionales y smart grid

Asimismo, el concepto de subsistema o microgrid (Lasseter and Paigi, 2004) aparece al asociar las fuentes de generación de energía eléctrica con las cargas o centros de consumo que requieren dicha energía. Esto permite realizar un control



local reduciendo la necesidad de sistemas de control centralizados y además en situaciones potencialmente peligrosas se pueden aislar cada microgrid con el fin de evitar que se vea afectada por la incidencia. Con este modelo de red, se reduce el coste de transportar energía, ya que únicamente se intercambia energía eléctrica entre microgrids cuando hay necesidad de importarla o exportarla, dando lugar al concepto de smart grid (Farhangi, 2010) como un conjunto de microgrids potencialmente autónomas, pero que en determinados instantes son capaces de importar o exportar energía eléctrica con el fin de satisfacer los requerimientos temporales. La figura 6.2 compara la topología de las redes tradicionales y las smart grid de acuerdo a (Farhangi, 2010) y además añade la topología de smart grids recursivas que permiten el anidamiento en concordancia con el modelo de sistema eléctrico definido a lo largo del documento.

Conforme se va extendiendo la generación distribuida y las microgrids, la distinción entre red de transporte y distribución pierde relevancia aunque su uso está condicionado por la legislación y las normativas vigentes. Por este motivo el caso de estudio adopta el modelo de generación distribuida, abstrayendo la naturaleza de la red de transporte o distribución, considerando que está compuesta por un conjunto de plantas generadoras de energía eléctrica próximas a la ciudad, líneas de transmisión entre las plantas y los centros que demandan energía eléctrica y conexiones con otras microgrids con el fin de importar o exportar en función de las necesidades concretas.

2.1. Microgrid de una ciudad tipo

Se considera una ciudad tipo de un tamaño medio con una población censada alrededor del cuarto de millón de habitantes. Dicha ciudad cuenta con 5 subestaciones de distribución conectadas en primera instancia a la red nacional de transporte y a su vez con diversas centrales de generación eléctrica. Debido a que el estudio se centra en la ciudad, estableciendo el nivel de abstracción en la propia ciudad, no se tiene en cuenta explícitamente toda la red nacional. Este hecho permite considerar las subestaciones como elementos generadores de la ciudad. Por lo tanto, dentro del modelo funcional de agentes definido en el tercer capítulo, las subestaciones se corresponden con los agentes de tipo F , y consecuentemente con el tipo *agenteF* dentro del framework para el desarrollo de sistemas multiagente para la distribución eléctrica *fdSMADe*. Las subestaciones



quedan identificadas F1, F2, F3, F4 y F5. La potencia máxima que cada subestación es capaz de proporcionar está determinada por el propio diseño de la subestación, la capacidad máxima de la red de transporte y de la potencia nominal de las centrales generadoras. Debido a que dichos elementos están fuera del ámbito, se asume que las centrales de distribución son capaces de suministrar la potencia requerida. Además de las centrales de distribución, también existen dos generadores de auxiliares, identificados como F6 y F7, que proporcionan corriente exclusivamente a cada uno de los hospitales cuando se quedan sin suministro eléctrico. La potencia de dichos generadores es de 850 y 600 KW respectivamente.

Adicionalmente a las 5 centrales de distribución y 2 generadores auxiliares, con el fin de hacer el caso de estudio más complejo, se consideran 3 centrales eléctricas basadas en fuentes de energía renovables, denominadas F8, F9 y F10. A la hora de determinar qué tipo de fuentes renovables incluir, se ha tenido en cuenta el criterio de complementariedad, dando relevancia a la utilización de fuentes que aprovechen diversos tipos de energía renovables y sobre todo cuando sea posible obtener electricidad a partir de diversos fenómenos. Por ello, gracias al clima, la radiación solar y los vientos existentes parece conveniente utilizar como materia prima la luz solar y el viento para generar electricidad mediante una planta fotovoltaica, otra termosolar y un parque eólico. La fotovoltaica depende exclusivamente de la radiación solar, al igual que la termosolar, aunque esta en cambio es capaz de almacenar calor y de producir electricidad incluso en ausencia de radiación solar. Y la eólica es capaz de generar electricidad independientemente de la radiación solar, ya que depende principalmente de la velocidad del viento.

La planta termosolar, denominada F8, tiene una capacidad de generación media anual de 24GWh/año. Lo que suponiendo un régimen de producción de 10 horas diarias durante todos los días del año, se estima una potencia media de unos 6.57MW.

A su vez, F9 representa una planta de energía fotovoltaica con una capacidad de generación media anual de 2.2 GWh/año, considerando una producción media de unas 8 horas al día durante el año, supone una potencia media de unos 750kW.

Finalmente, F10 representa un parque eólico con una capacidad de generación media de 38.5 GWh/año anuales, teniendo en cuenta una producción diaria durante 20 horas, se obtiene una potencia media de unos 5.27MW. La tabla



6.2 resume las características principales de las fuentes de generación eléctrica del caso de estudio.

Descripción	Identificador	Potencia Media	Respeto medioambiental
Subestación de distribución	F1, F2, F3, F4, F5	Superior a la demanda	Bajo
Generador auxiliar hospital 1	F6	850KW	Muy Bajo
Generador auxiliar hospital 2	F7	600 KW	Muy Bajo
Central termosolar	F8	6.57MW	Alto
Planta fotovoltaica	F9	750kW	Alto
Parque eólico	F10	5.27MW	Alto

Tabla 6.2 Tabla resumen de los elementos generadores de electricidad de la ciudad

Los datos de consumo energético de la ciudad tipo se han obtenido a partir de los datos proporcionados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía del Ministerio de Industria, Energía y Turismo (IDAE, 2009). Los requerimientos energéticos de la ciudad tipo se estiman en 807.2 GWh/año. La ciudad se ha segmentado en una serie de centros de consumos representativos en función de los usos más significativos, buscando caracterizar la naturaleza heterogénea de las ciudades: alumbrado público, residencial, industrial, centro comercial, universitario, deportivo y hospitalario. Adicionalmente, se han considerado varias instancias de algunos de estos tipos de centros con el fin de obtener mayor realismo. La energía requerida por cada uno de estos centros se ha calculado asumiendo una distribución temporal lineal a lo largo del año del consumo de eléctrico total, ya que no se pretende tener en cuenta las variaciones



estacionarias. La tabla 6.3 muestra la relación de centros de consumo, identificados como C1, C2,..., C9, indicando su correspondiente consumo energético anual.

Descripción	Identificador	Demanda energética
Alumbrado público	C1	25.83 GWh/año
Hospital A	C2	2.22 GWh/año
Hospital B	C3	3.69 GWh/año
Polígono industrial A	C4	247 GWh/año
Polígono industrial B	C5	164 GWh/año
Zona residencial	C6	226 GWh/año
Centro comercial	C7	51.66 GWh/año
Polideportivo	C8	28 GWh/año
Campus universitario	C9	58.5 GWh/año

Tabla 6.3 Demanda energética de cada centro de consumo de la ciudad tipo

Se establecen múltiples relaciones de suministro y consumo energético para cada elemento F_x y C_y , de esta forma se amplía el abanico de posibilidades a la hora de que cada elemento C_y pueda obtener suministro eléctrico. Cada centro de consumo, C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 y C9 va a poder ser suministrado por las diversas subestaciones de distribución F1, F2, F3, F4 y F5. Independientemente, C2 puede obtener electricidad de F6, cuando el resto de fuentes no sean capaces de suministrar electricidad. De la misma forma, F7 es capaz de proporcionar electricidad a C3 bajo las mismas condiciones. Respecto a las fuentes de energía renovables: F8 puede suministrar corriente a C7, C8 o C9; F9 a C2 y C3; y F10 a C1, C7 y C9. Esta información queda reflejada en tabla 6.4 donde se muestra la matriz de adyacencia que representa las relaciones binarias entre ellos.



Cx/Fy	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
C1	✓	✓	✓	✓	✓					✓
C2	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	
C3	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	
C4	✓	✓	✓	✓	✓					
C5	✓	✓	✓	✓	✓					
C6	✓	✓	✓	✓	✓					
C7	✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓
C8	✓	✓	✓	✓	✓			✓		
C9	✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓

Tabla 6.4 Relación binaria que representa abastecimiento energético entre generadores y consumidores

2.2. Arquitectura del sistema multiagente en el framework *pSMADÉ*

Los componentes detallados en la sección anterior se representan con instancias de los tipos de agente definidos a lo largo del modelo estructural y tecnológico (capítulos 3 y 5), con el propósito de obtener el sistema multiagente que permita gestionar la distribución eléctrica. Para ello, se detalla la correspondencia entre cada componente eléctrico del caso de estudio y los modelos funcional / estructural, las clases de agentes definidas en el framework *fdSMADÉ* y el entorno de prototipado *pSMADÉ*.

Los componentes identificados como F_x y C_y , se corresponden con las clases de agente definidas en el modelo estructural F , C y con instancias de las clases de agentes definidas en el modelo tecnológico **AgenteF** y **AgenteC**. No se va a crear



ninguna instancia de T , ni **AgenteT**, ya que las líneas de transmisión no se tienen en cuenta debido a que las pérdidas energéticas derivadas de la impedancia propia del tendido eléctrico no son relevantes para este caso de estudio.

Además de los agentes que se encargan de manipular la electricidad, el sistema multiagente contiene una instancia de cada una de las clases de agentes que proporcionan servicios: agente búsqueda de agentes BA , tal y como se ha definido en el modelo tecnológico, se corresponde con el agente **DFService**; agente interfaz de usuario, IU con **RMA**; agente de optimización global OG con **AgenteOG**; agente de simulación de potencia SP con **AgenteSP**; agente de predicción meteorológica PM con **AgentePM**. Los agentes **DFService**; y **RMA** los implementa el framework **JADE**. La correspondencia entre los distintos tipos de modelos, el entorno de prototipado, el framework **JADE**, y sus respectivos identificadores se puede observar en la tabla 6.5.



Id caso de estudio	Modelo estructural	Modelo tecnológico	Entorno de prototipado	Id JADE
F_x	F	AgenteF		FAx
C_y	C	AgenteC		CAy
-	OG	AgenteOG	-	OGA1
-	SP	AgenteSP	-	SPA1
-	IU	AgenteIU	-	RMA
-	BA	AgenteBA	-	DFService
-	PM	AgentePM	-	PMA1

Tabla 6.5 Correspondencia entre componentes del caso de estudio y los modelos estructural, tecnológico f.d.SMADE y entorno de prototipado pSMADE



A continuación, en las siguientes tablas se detallan los valores de los parámetros de cada una de las instancias de agentes, que van a modelar el caso de estudio de la ciudad. El parámetro *potenciaNom*, que indica la potencia máxima que es capaz de proporcionar dicho agente, se le asigna el valor infinito a los agentes FA1, FA2, FA3, FA4 y FA5, ya que se consideran que son capaces satisfacer los requerimientos energéticos.

Parámetros agenteF	FA1-5	FA6	FA7	FA8	FA9	FA10
<i>potenciaNom (kW)</i>	∞	850	600	2740	251	4395
<i>tensión (V)</i>	220	220	220	220	220	220
<i>potenciaDisponible_t</i>	figura 6.3					
<i>reservaMin(%)</i>	80	90	90	80	80	90
<i>costeUnitProd (€/kWh)</i>	0,14	0,2	0,2	0,28	0,38	0,08
<i>precioUnitVenta (€/kWh)</i>	0,16	0,22	0,22	0,3	0,4	0,1
<i>toxicidad</i>	8	9	9	2	2	1
<i>condGestionCarga</i>	1	1	1	1	1	1
<i>políticaReducción</i>	3	1	1	1	1	1
<i>nodoComputación</i>	local	local	local	local	local	local

Tabla 6.6 Valor de los parámetros de los agentes FA1, FA2, FA3, FA4, FA5, FA6, FA7, FA8, FA9 y FA10

El parámetro *potenciaDisponible_t* refleja la curva de generación que tiene el componente Fy. Este parámetro depende del tiempo, por lo que dicha curva de generación se muestra en la figura 6.3.



El parámetro *condGestiónCarga*, que hace referencia a cuando se envían solicitudes de reducción de consumo a los agentes consumidores. El valor 1 indica que se desencadenan en cuanto la producción es superior al valor definido como *reservaMínima*, el valor 2 indica que se desencadenan en cuanto la demanda actual es superior a la media de la generación anterior; el valor 3 hace que se envíen las solicitudes cuando las previsiones de generación es desfavorable; y el valor 4 tiene en cuenta a todas las situaciones anteriores.

El valor 1 del parámetro *políticaReducción* hace referencia a que se solicitan a un número reducido de agentes consumidores que reduzcan su consumo lo máximo posible. El valor 2, que el mayor número posible de agentes consumidores reduzcan lo mínimo posible; y el valor 3, busca un equilibrio entre el número de agentes consumidores que han reducido su consumo y cuanto lo han hecho.

El parámetro *nodoComputación* cuando tiene el valor “local” indica que dicho agente se ejecuta en el mismo nodo de computación en el que está desplegado el contenedor principal del framework JADE.

Parámetros agenteC	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5
<i>potenciaMax(kW)</i>	2949	421	252	28197	18798
<i>tensión (V)</i>	220	220	220	220	220
<i>potenciaRequerida_t</i>	figura 6.4	figura 6.5		figura 6.6	
<i>modosFunc</i>	2	3	3	1	1
<i>criterioElecciónProd</i>	(50, 50,0)	(50, 50,0)	(50,50,0)	(50, 50,0)	(50, 50,0)
<i>tipoSolicitud</i>	2	2	2	2	2
<i>nodoComputación</i>	local	local	local	local	local

Tabla 6.7 Valor de los parámetros de los agentes CA1, CA2, CA3, CA4 y CA5

El parámetro *potenciaRequerida_t* refleja la curva de carga que tiene el componente Cy. Este parámetro depende del tiempo, por lo que en las



correspondientes tablas aparece las figuras que muestran dichas curvas de carga: figura 6.4, figura 6.5 y figura 6.6.

Parámetros agenteC	CA6	CA7	CA8	CA9
<i>potenciaMax(kW)</i>	25801	5897	3137	6638
<i>tensión (V)</i>	220	220	220	220
<i>potenciaRequerida</i>	figura 6.6	figura 6.4	figura 6.4	figura 6.4
<i>modosFunc</i>	1	3	3	3
<i>criterioElecciónProd</i>	(50, 50, 0)	(80, 20, 0)	(80, 20, 0)	(80, 20, 0)
<i>tipoSolicitud</i>	2	2	2	2
<i>nodoComputación</i>	local	local	local	local

Tabla 6.8 Valor de los parámetros de los agentes CA6, CA7, CA8 y CA9

El parámetro *modosFunc* refleja los distintos modos de funcionamiento que el agente consumidor tiene. En posteriores tablas (tabla 6.9, tabla 6.10, tabla 6.11, tabla 6.12, tabla 6.13, tabla 6.14, tabla 6.15, tabla 6.16 y tabla 6.17) se muestra el consumo de cada modo de funcionamiento y si es posible deshabilitarlo – crítico = 0- en el caso de que reciba una solicitud de reducción de consumo de algún agente vecino dotado del rol *prod*.

El parámetro *criterioElecciónProd* está compuesto por la tripleta, en el que cada elemento es un factor de ponderación para valorar las características de los agentes fuente de energía. La primera componente pondera la característica del respeto medioambiental; la segunda el coste económico, y la tercera la capacidad de generación.

El parámetro *tipoSolicitud* refleja el tipo de estrategia a la hora de solicitar suministro energético. La estrategia total, representada por el valor 1, solicita toda la energía necesaria a cada uno de los agentes fuente, en cambio la estrategia proporcional, representada por el valor 2, intenta repartir la carga entre todos los agente fuente de los que se puede abastecer.



Modos funcionamiento CA1	Consumo (kW)	Crítico
Iluminación básica	1449	1
Iluminación prescindible	1500	0

Tabla 6.9 Modos de funcionamiento que caracterizan al alumbrado público

Modos funcionamiento CA2	Consumo (kW)	Crítico
Servicios mínimos	280	1
Climatización zonas comunes	80	0
Iluminación zonas comunes	61	0

Tabla 6.10 Modos de funcionamiento que caracterizan al hospital A

Modos funcionamiento CA3	Consumo (kW)	Crítico
Servicios mínimos	170	1
Climatización zonas comunes	52	0
Iluminación zonas comunes	30	0

Tabla 6.11 Modos de funcionamiento que caracterizan al hospital B

Modos funcionamiento CA4	Consumo (kW)	Crítico
Servicios propios	28197	1

Tabla 6.12 Modos de funcionamiento que caracterizan al polígono industrial A



Modos funcionamiento CA5	Consumo (kW)	Crítico
Servicios propios	18798	1

Tabla 6.13 Modos de funcionamiento que caracterizan al polígono industrial B

Modos funcionamiento CA6	Consumo (kW)	Crítico
Servicios propios	25801	1

Tabla 6.14 Modos de funcionamiento que caracterizan a la zona residencial

Modos funcionamiento CA7	Consumo (kW)	Crítico
Servicios mínimos	4050	1
Servicios prescindibles	1347	0
Servicios altamente prescindibles	500	0

Tabla 6.15 Modos de funcionamiento que caracterizan al centro comercial

Modos funcionamiento CA8	Consumo (kW)	Crítico
Servicios mínimos	2245	1
Climatización prescindible	728	0
Iluminación prescindible	200	0

Tabla 6.16 Modos de funcionamiento que caracterizan al complejo deportivo



Modos funcionamiento CA9	Consumo (kW)	Crítico
Servicios mínimos	3800	1
Climatización e iluminación prescindible	2138	0
Equipamiento prescindible	700	0

Tabla 6.17 Modos de funcionamiento que caracterizan al campus universitario

Las siguientes tablas muestran los valores asignados a los parámetros de los agentes de tipo **AgenteOG**, **AgenteSP** y **AgentePM**.

Parámetros OGA	OGA1
<i>tDisponibleComp (s)</i>	60
<i>criterioEcológico</i>	<1,50>
<i>criterioEconómico</i>	<2,30>
<i>criterioSatisfacción</i>	<3, 20>

Tabla 6.18 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de optimización global OGA1

El agente OGA1 está configurado para utilizar un tiempo máximo de 60 segundos para buscar una solución que mejore la anterior. La solución óptima está orientada a ponderar con un 50% el respeto medioambiental gracias al uso de las fuentes de energía renovables, otorgando un 30% de peso al bajo coste del kW/h y un 20% a la satisfacción del usuario, de forma que la reducción de consumo por parte de los centros de consumo, no penalice la bondad de la solución. Los valores del agente OGA1 se pueden ver en la tabla 6.18.

El agente SPA1 está configurado para simular el consumo y la generación durante 24h. Se establecen pasos de simulación de una hora de duración,



ejecutando en cada paso de la simulación, la gestión de la distribución eléctrica. Los valores asociados a este agente se pueden ver en la tabla 6.19.

Parámetros SPA	SPA1
<i>duración (h)</i>	24
<i>pasoSimulación(s)</i>	3600

Tabla 6.19 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de simulación de potencia SPA1

El agente PMA1 está configurado para obtener datos climatológicos, de la ciudad de Alicante, para el día 25 de junio, ya que únicamente se va a simular durante 24 horas. Esto se puede observar tabla 6.20.

Parámetros PMA	PMA1
<i>latitud</i>	38.3452
<i>longitud</i>	-0.481006
<i>fecha inicio</i>	25 junio
<i>fecha fin</i>	26 junio

Tabla 6.20 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de predicción meteorológica PMA1

2.3. Capacidad de generación y requerimientos energéticos

Las fuentes de energía que no dependen de las condiciones climáticas son capaces de suministrar, en caso de que sea necesario, una potencia eléctrica cercana a su potencia nominal, siempre y cuando no ocurra ninguna incidencia que lo impida.

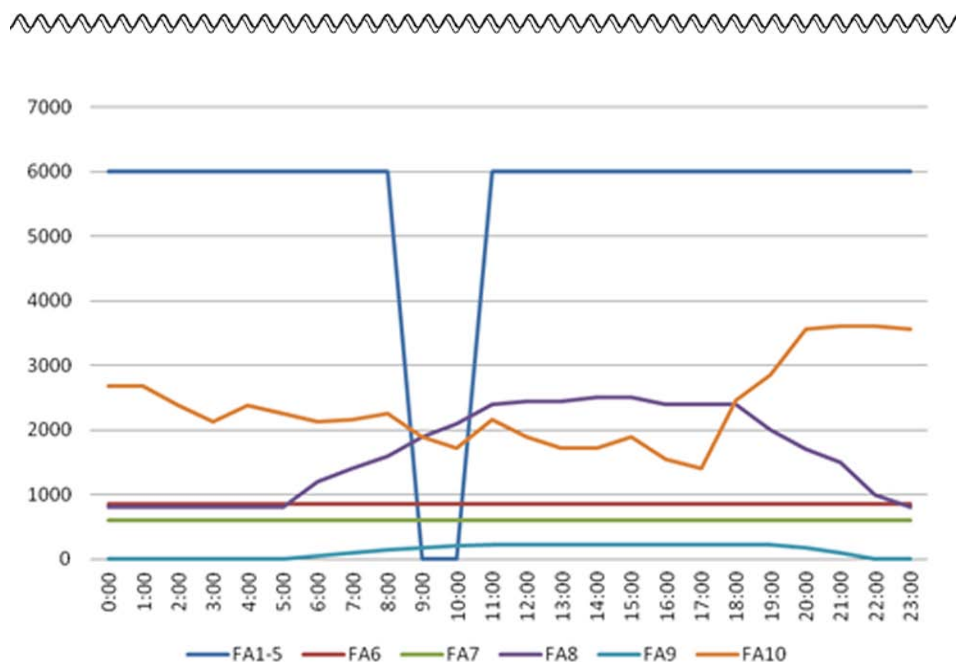


Figura 6.3 Curvas de generación máxima de los agentes FA1, FA2, FA3, FA4, FA5, FA6, FA7, FA8, FA9 y FA10

En el caso de los agentes FA1, FA2, FA3, FA4 y FA5 son capaces de suministrar toda la energía eléctrica que sea necesario, por lo que para la experimentación se ha elegido un valor arbitrario suficientemente alto como para que sea capaz de satisfacer a todos los centros de consumo. Con la única excepción de un corte de suministro de dos horas de duración, de 9:00 a 11:00 de la mañana con el fin de determinar el comportamiento del sistema ante tal incidencia. Los agentes FA6 y FA7, que representan a los generadores auxiliares de los hospitales, son capaces de suministrar una potencia cercana a su potencia nominal durante todo el día. La producción de los agentes FA8, FA9 y FA10, que dependen de las condiciones climáticas, se ha calculado tal y como se ha descrito en el capítulo 5. Las curvas de generación máxima de cada uno de los agentes fuentes se pueden observar en la figura 6.3.

Los requerimientos energéticos de cada uno de los agentes CAX se han simulado para un uso cotidiano. Las curvas de carga de cada uno de los agentes se han agrupado en figuras distintas en función de la intensidad. La figura 6.4 muestra las curvas de carga de los agentes CA1, CA7, CA8 y CA9.

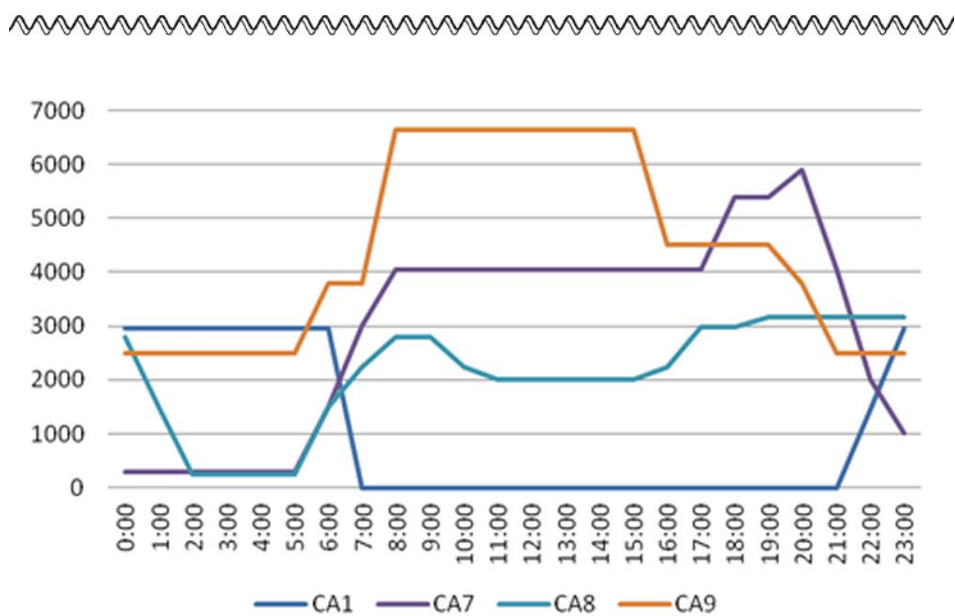


Figura 6.4 Curvas de carga de los agentes CA1, CA7, CA8 y CA9

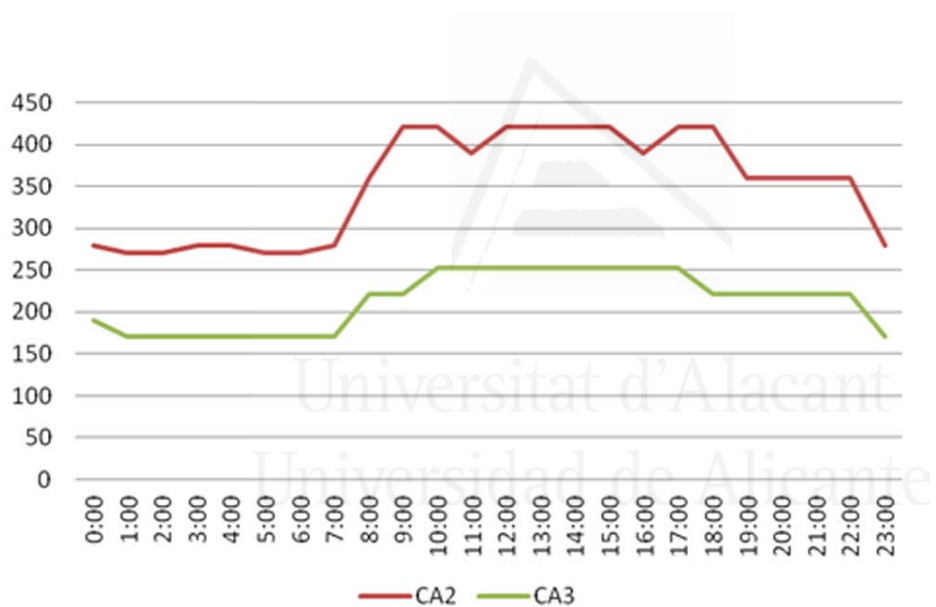


Figura 6.5 Curvas de carga de los agentes CA2 y CA3

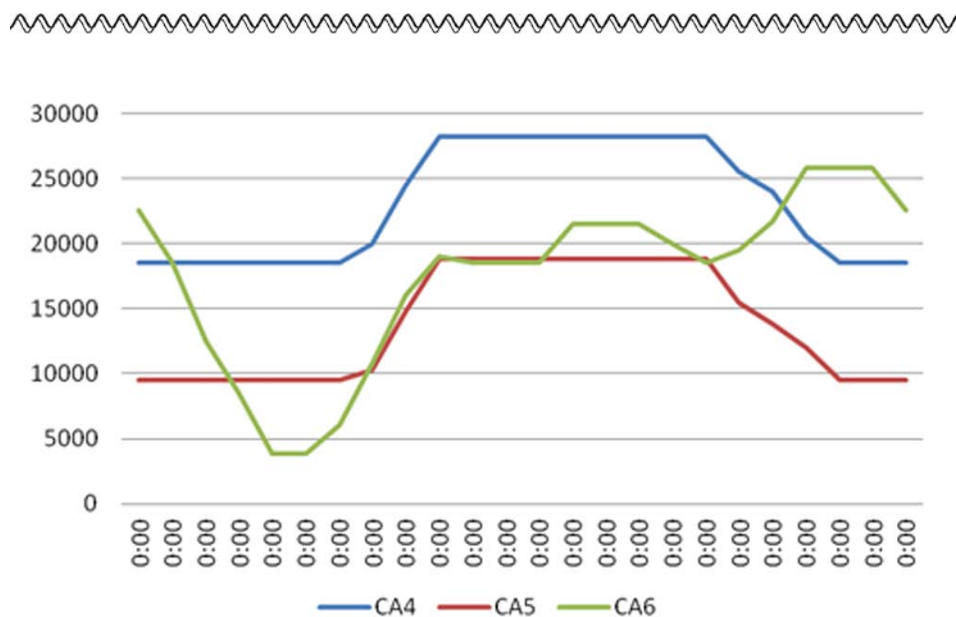


Figura 6.6 Curvas de carga de los agentes CA4, CA5 y CA6

La figura 6.5 representa las curvas de carga de los agentes CA2 y CA3. Por último, la figura 6.6 refleja los requerimientos energéticos de los agentes CA4, CA5 y CA6.

2.4. Distribución eléctrica

Una vez que se ha mostrado la capacidad máxima de generación y los requerimientos energéticos, se procede a mostrar los resultados obtenidos de la gestión de la distribución eléctrica. En dichos resultados se muestra la potencia eléctrica suministrada por cada agente FAX hacia los agentes CAY, de forma que se puede apreciar que la potencia distribuida por los agentes FAX no tiene por qué corresponderse con la potencia máxima que son capaces de suministrar en cada periodo de tiempo. Igualmente, la potencia requerida por cada CAY, puede que no haya sido suministrada totalmente si ha sido posible disminuir su consumo energético en base a las solicitudes de reducción de consumo enviadas por los agentes de tipo FAX.

En las siguientes dos secciones se muestra el comportamiento de los agentes centros de consumo CAY y de los agentes fuentes de energía FAX.



2.4.1. Suministro a agentes CAY

Las gráficas mostradas a continuación hacen referencia a las características del suministro energético de cada agente CAY: la potencia demanda inicialmente; la que realmente ha sido suministrada, que no tiene porqué coincidir con la requerida; y la contribución de cada uno de los agentes de tipo FAX. Los agentes CA1, CA2, CA3, CA4, CA5, CA6, CA7, CA8 y CA9 se muestran en figura 6.7, figura 6.8, figura 6.9, figura 6.10, figura 6.11, figura 6.12, figura 6.13, figura 6.14 y figura 6.15 respectivamente.

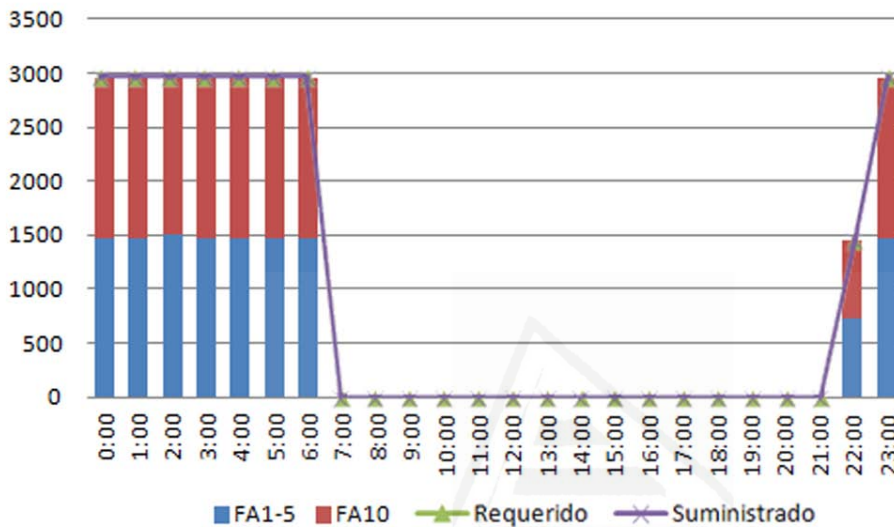


Figura 6.7 Consumo requerido por CA1 que ha sido suministrado por FA1-5 y FA10

Los datos mostrados por la figura 6.7 reflejan que el sistema de alumbrado público ha sido abastecido completamente durante todo el intervalo de tiempo, ya que la potencia suministrada ha coincidido con la que ha sido requerida. Respecto a la naturaleza de las fuentes de energía suministradoras, se puede apreciar que la energía eléctrica es suministrada de forma equilibrada entre las subestaciones de distribución FA1-5 y el parque eólico FA10.

La información que refleja la figura 6.8 hace alusión al hospital A, concretamente a la potencia requerida. La potencia requerida puntualmente no coincide con la que realmente ha sido suministrada, debido a que el hospital ha sido capaz de reducir el consumo energético de los servicios prescindibles cuando



ha sido necesario (8:00- 10:00, 12:00, 18:00-19:00 y 21:00). Las reducciones voluntarias de consumo están representadas como valores negativos que en la leyenda aparece como "Reducido". El hospital está alimentado principalmente por las subestaciones de distribución (FA1-5), cuando es posible por la planta fotovoltaica (FA9) y durante el periodo de corte de suministro por el generador auxiliar (FA6). El fallo de suministro contemplado desde las 7:00 hasta las 9:00, ha sido compensado por el generador auxiliar y por la planta fotovoltaica, de hecho durante la primera hora no ha sido necesario reducir el consumo del hospital, siendo conveniente realizar esta acción a las 8:00. Posteriormente, a lo largo del día se han llevado a cabo acciones de reducción de consumo debido al gran uso de la planta fotovoltaica, compartida con otros centros de consumo.

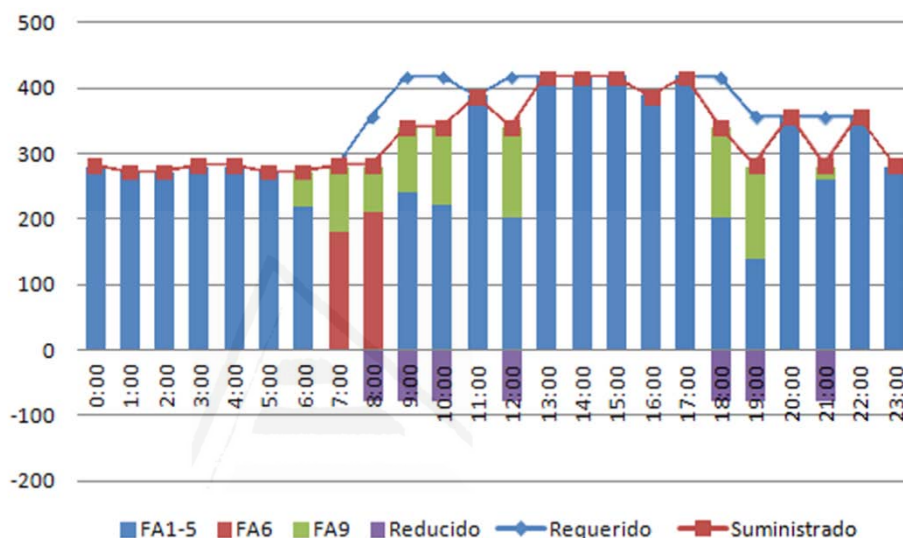


Figura 6.8 Consumo requerido por CA2 que ha sido suministrado por FA1-5, FA6 y FA9

La gráfica mostrada en la figura 6.9, representa al hospital B. El comportamiento es en líneas generales similar al del hospital A, con la diferencia de que durante el periodo de falta de suministro por parte de FA1-5, ha sido el generador auxiliar FA7 el encargado de proporcionar energía eléctrica, debido a que la producción de FA9 estaba destinada al hospital A. En cambio, FA9 ha sido el principal proveedor eléctrico durante 11:00, 13:00 -17:00 y 20:00.

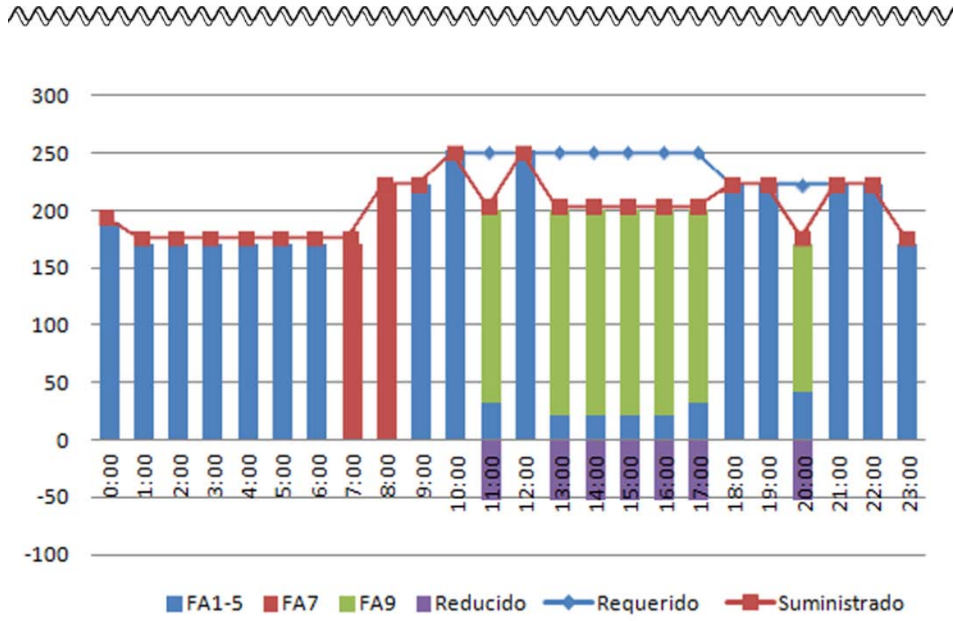


Figura 6.9 Consumo requerido por CA3 que ha sido suministrado por FA1-5, FA7 y FA9

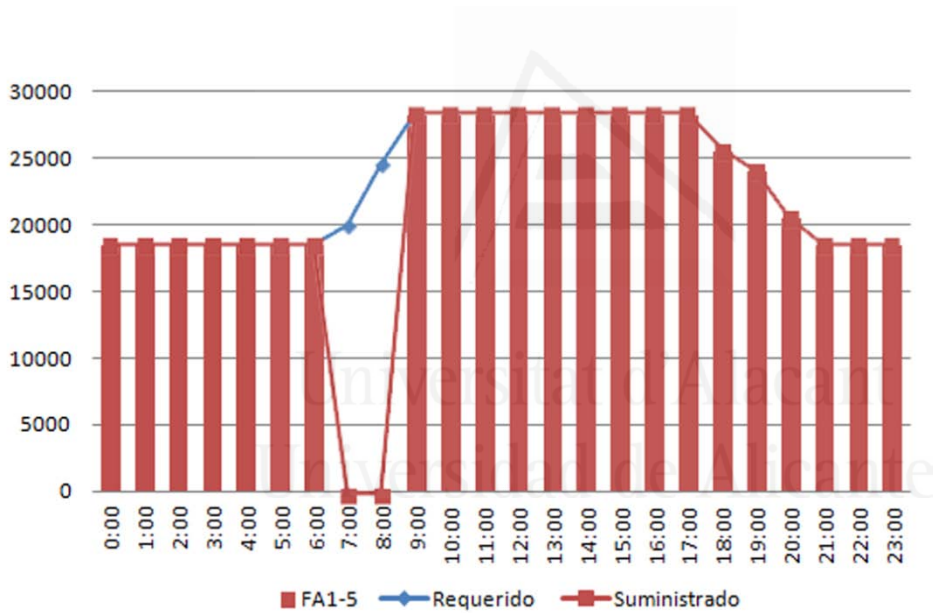


Figura 6.10 Consumo requerido por CA4 que ha sido suministrado por FA1-5

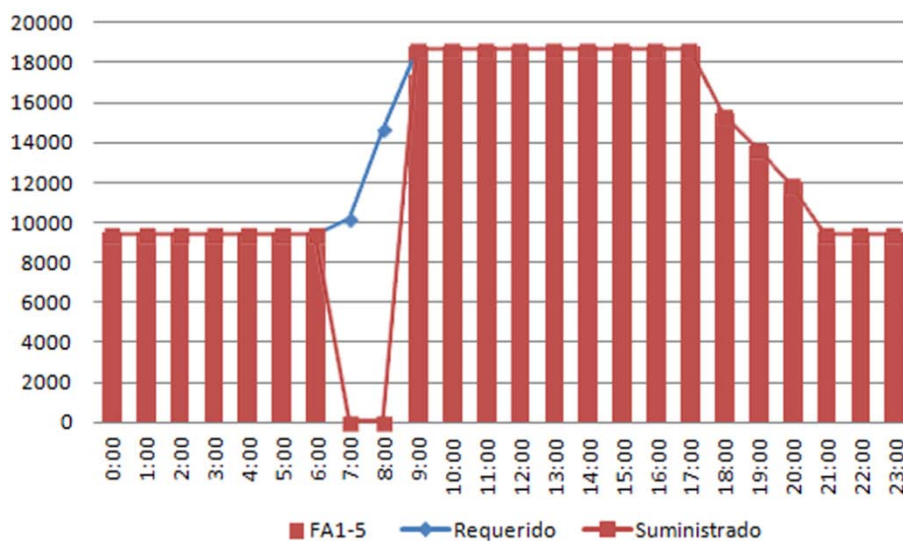


Figura 6.11 Consumo requerido por CA5 que ha sido suministrado por FA1-5

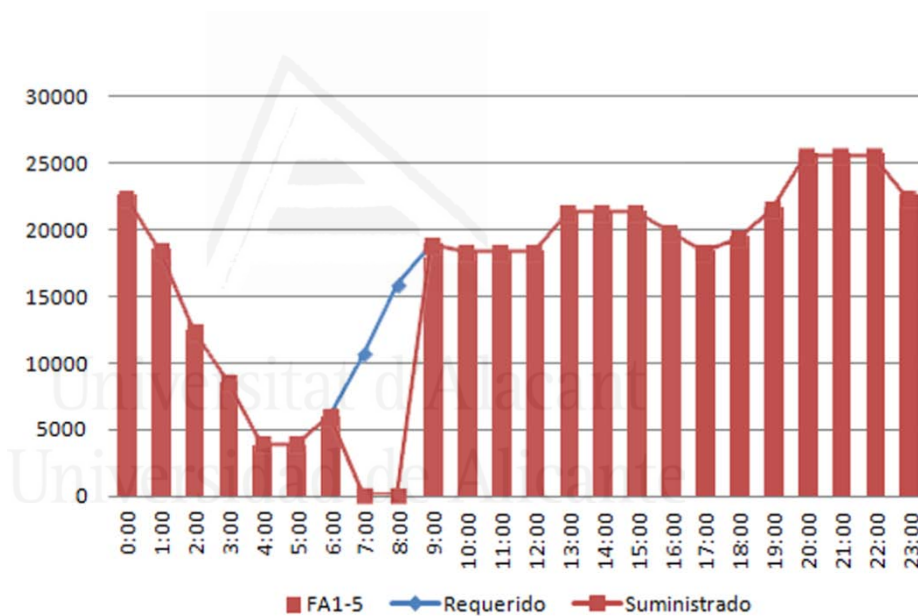


Figura 6.12 Consumo requerido por CA6 que ha sido suministrado por FA1-5



Las gráficas mostradas en la figura 6.10, figura 6.11 y figura 6.12 se corresponden con el polígono industrial A, el B y la zona residencial. En estos casos, al no ser capaces de reducir su consumo y al tener únicamente como suministradores energéticos a las subestaciones de distribución, la potencia eléctrica requerida coincide con la suministrada, excepto durante el fallo de suministro.

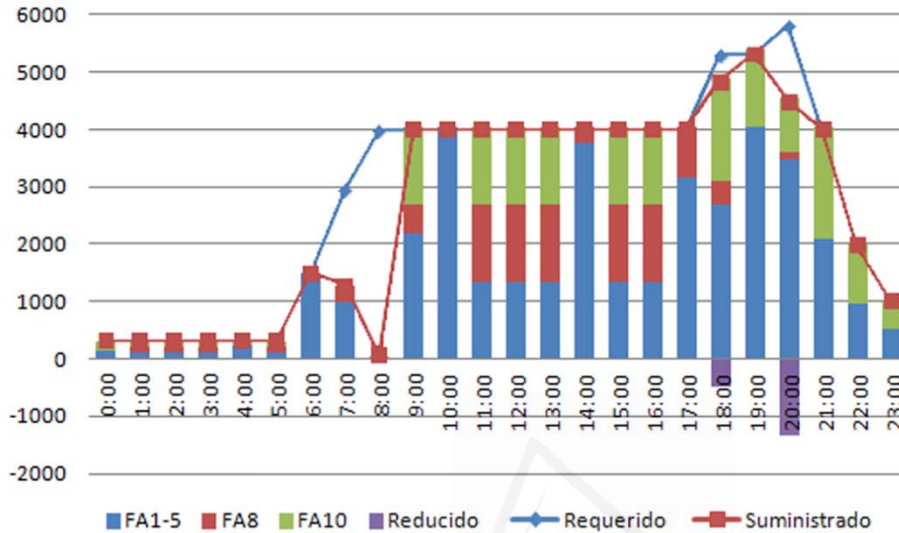


Figura 6.13 Consumo requerido por CA7 que ha sido suministrado por FA1-5, FA8 y FA10

La figura 6.13 representa el consumo energético del centro comercial, en el que se puede ver que la potencia suministrada es equiparable a la requerida a excepción de las 7:00 -8:00, 18:00 y 21:00. La energía requerida está suministrada de forma equitativa durante la mayoría de las horas entre las subestaciones de distribución FA1-5, la central termosolar FA8 y el parque eólico FA10. Se han realizado a las 18:00 y a las 20:00 reducciones de consumo, coincidiendo con la diferencia entre la potencia requerida y la suministrada.

El consumo energético del polideportivo se muestra en la figura 6.14. Se aprecia que la potencia obtenida concuerda con la requerida a excepción de los siguientes periodos: 7:00 – 9:00 y 19:00 - 23:00. El suministro energético lo proporcionan la subestaciones de distribución FA1-5 y la central termosolar FA8, siendo la primera de ellas la que tiene protagonismo ligeramente superior. El polideportivo reduce su consumo de forma puntual a las 9:00 y de forma



continuada desde 19:00 hasta las 23:00 con el fin de amortiguar el periodo de mayor consumo energético. FA1-5 es el único suministrador a las 17:00. Esto se debe a que FA8 dedica toda su producción a CA7 y CA9, tal y como se puede observar en la figura 6.19.

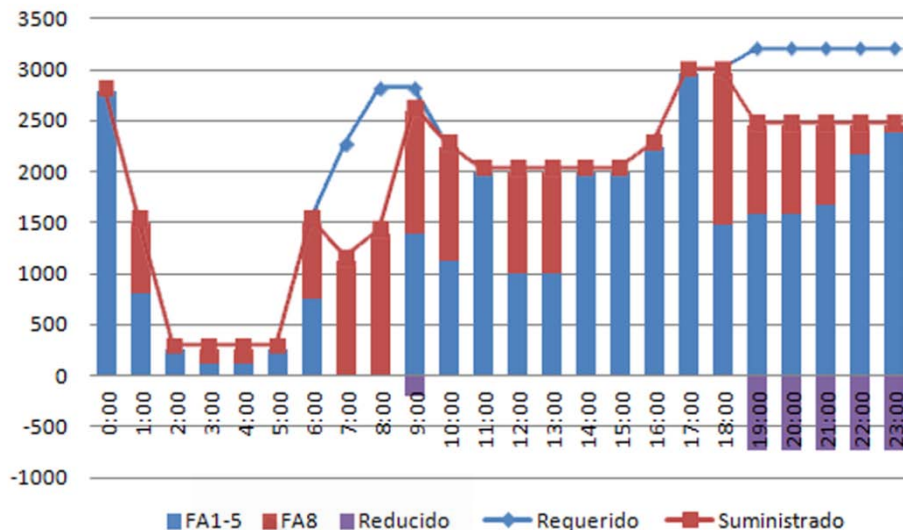


Figura 6.14 Consumo requerido por CA8 que ha sido suministrado por FA1-5 y FA8

La naturaleza del abastecimiento energético del campus universitario se presenta en la figura 6.15. En ella, se aprecia que la potencia suministrada se corresponde con la requerida excepto durante el periodo de fallo de suministro de FA15, de 10:00 - 11:00, 14:00 - 17:00 y 19:00. El abastecimiento energético lo proporcionan las subestaciones de distribución FA1-5, la central termosolar FA8 y la planta eólica FA10 en prácticamente todas las franjas horarias. En los periodos de bajos requerimientos energéticos el suministro está repartido entre FA1-5, FA8 y FA10, en cambio en los periodos de alto consumo FA1-5 adquiere mayor relevancia a pesar de las reducciones de consumo efectuadas por el campus. Las reducciones de consumo se producen durante los siguientes periodos 10:00 - 11:00, 14:00 - 17:00 y 19:00, ya que en dichos periodos FA8 y FA10 sobrepasan el nivel crítico de producción.

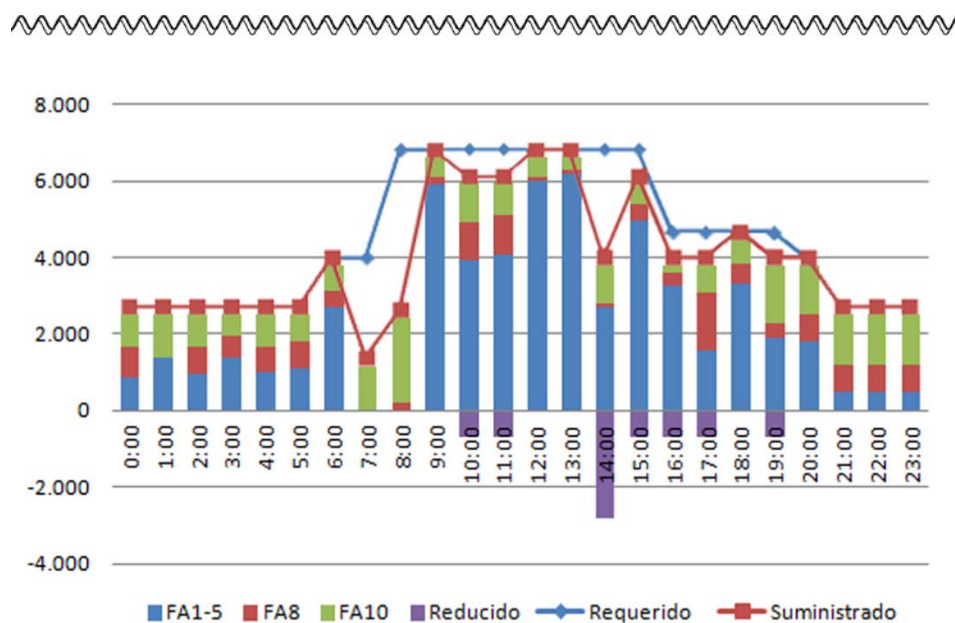


Figura 6.15 Consumo requerido por CA9 que ha sido suministrado por FA1-5, FA8 y FA10

2.4.2. Producción de agentes FAX

Consecuentemente con las gráficas mostradas para cada agente CAY, a continuación se muestra para cada agente FAX los destinatarios del suministro energético, así como la producción máxima y la que realmente se ha realizado. El comportamiento de los agentes FA1-5, FA6, FA7, FA8, FA9 y FA10 se ilustra en las gráficas que se muestran en: figura 6.16, figura 6.17, figura 6.18, figura 6.19, figura 6.20 y figura 6.21, respectivamente.

El reparto energético del conjunto de subestaciones de distribución FA1-5 se muestra en la figura 6.16. En función de los criterios de optimización de la distribución, el uso que se hace de FA1-5 tiene el fin de proporcionar la energía eléctrica que no es capaz de suministrar FA8, FA9 ni FA10, o de soportar la carga proporcional al número de agentes FAX vinculados a cada agente CAY. Como los agentes FA8, FA9 y FA10 no son capaces por sí solos de suministrar la potencia requerida, los agentes CAY hacen uso del agente FA1-5 en algún instante de tiempo. Los agentes CA4, CA5 y CA6 son los que mayor demanda presentan, ya que únicamente están conectados a FA1-5. En cambio, el resto de agentes CA1,



CA2, CA3, CA7, CA8 y CA9, al ser capaces de obtener suministro de FA8, FA9 o FA10, presentan una menor demanda energética sobre FA1-5.

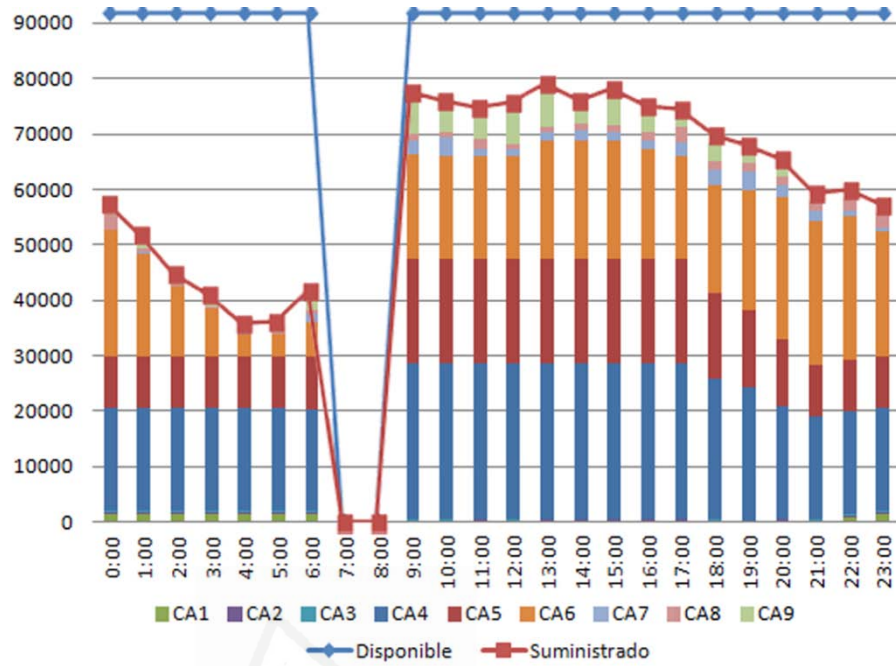


Figura 6.16 Distribución del suministro energético aportado por FA1-5 hacia CA1, CA2, CA3, CA4, CA5, CA6, CA7, CA8 y CA9

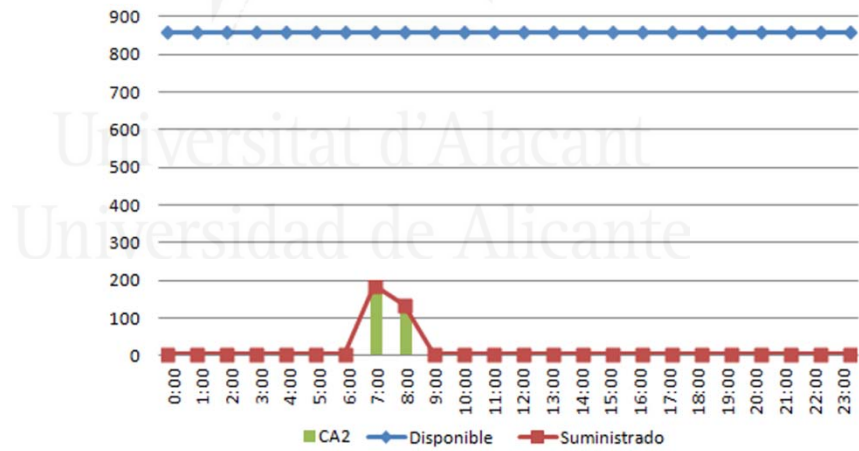


Figura 6.17 Distribución del suministro energético aportado por FA6 hacia CA2



Las curvas de generación de FA6 y FA7, que se muestran en la figura 6.17 y la figura 6.18, respectivamente. Se corresponden con los generadores auxiliares de cada uno de los hospitales. En este escenario únicamente se han conectado durante el periodo de fallo de suministro de FA1-5 ocurrido de 7:00 – 8:00, durante el resto del tiempo no se ha hecho uso de ellos.

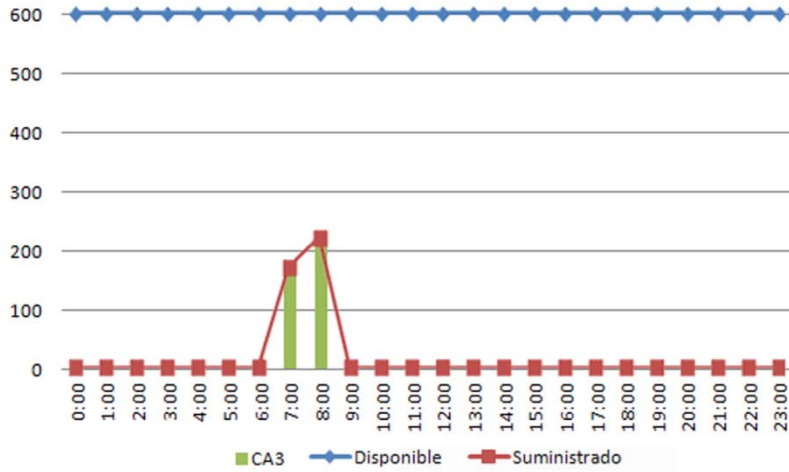


Figura 6.18 Distribución del suministro energético aportado por FA7 hacia CA3

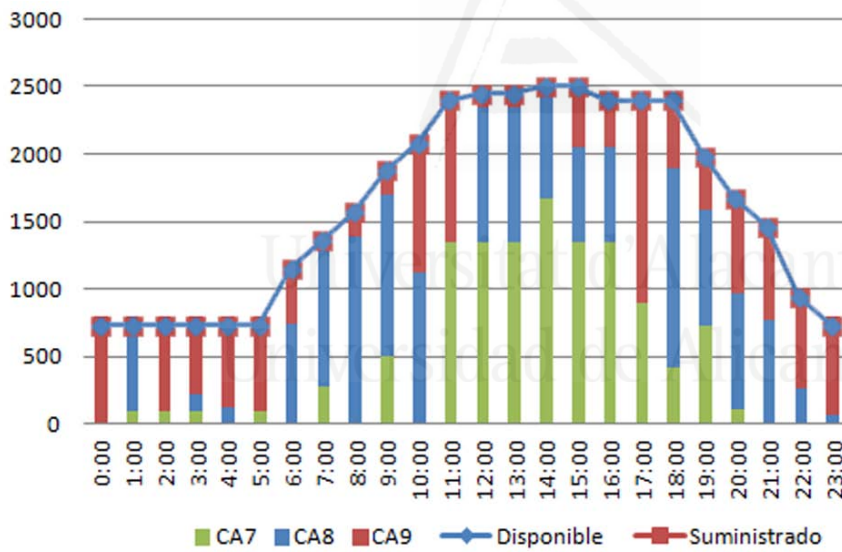


Figura 6.19 Distribución del suministro energético aportado por FA8 hacia CA7, CA8 y CA9



El reparto del suministro energético de la central termosolar FA8 se muestra en la figura 6.19. El principal aspecto a tener en cuenta es que la potencia suministrada se corresponde con la disponible durante todo el periodo, lo que evidencia el alto grado de utilización de la central termosolar por parte de los agentes CA7, CA8 y CA9. Analizando el reparto de la potencia suministrada entre ellos, se observa que en la mayor parte del periodo se distribuye entre 2 o 3 de los agentes demandantes, aunque de forma puntual a las 0:00 y a las 8:00 se realiza hacia un único consumidor.

La figura 6.20 muestra la distribución energética del agente planta fotovoltaica FA9 entre los agentes CA2 y CA3. En este caso la potencia disponible también coincide con la suministrada durante todo el periodo, lo que refleja el alto uso de la planta fotovoltaica por parte de los hospitales.

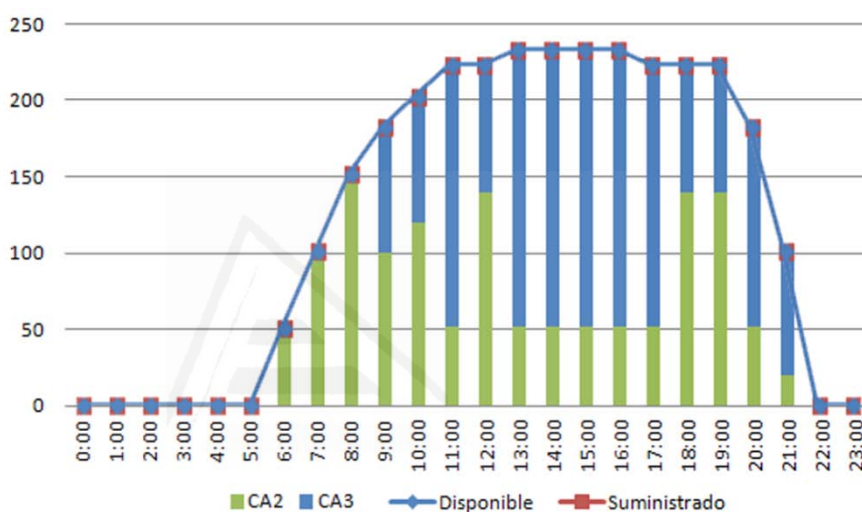


Figura 6.20 Distribución del suministro energético aportado por FA9 hacia CA2 y CA3

Por último, la figura 6.21 muestra el reparto energético del parque eólico FA10 entre los agentes CA1, CA7 y CA9. En este caso, la potencia disponible se corresponde con la suministrada durante todo el tiempo a excepción de dos periodos, concretamente a las 0:00 y de 22:00 – 23:00. Estas diferencias entre la potencia disponible y suministrada se debe a que tanto CA1 como CA7 prefieren que la carga se divida de forma proporcional entre FA1-5 y F10, por lo que cada uno aporta la mitad de sus requerimientos. Esto supone que no sea posible suministrar el excedente de FA10.

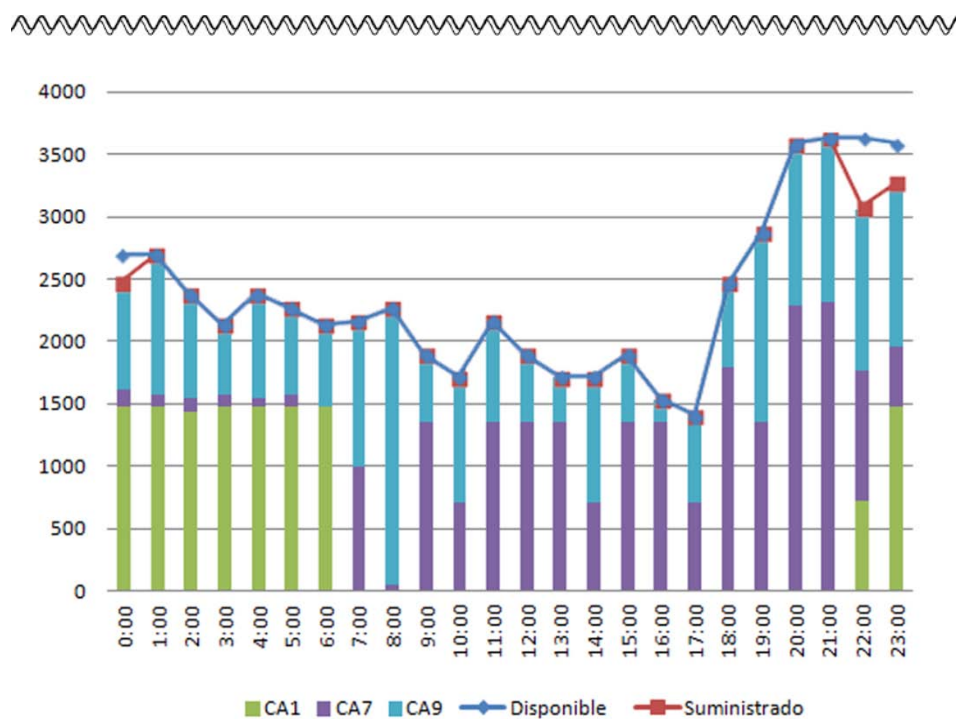


Figura 6.21 Distribución del suministro energético aportado por FA10 hacia CA1, CA7 y CA9



3. Dispositivos electrónicos portables

El nivel de abstracción del siguiente caso de estudio es el de los dispositivos portables, concretamente el de los dispositivos electrónicos portables, como pueden ser teléfonos móviles, ordenadores portátiles, sistemas de geoposicionamiento, reproductores de música, etc.... La naturaleza móvil de este tipo de dispositivos hace que el acceso a la red eléctrica no esté siempre disponible, lo que requiere el uso de medios de almacenamiento, normalmente baterías químicas. La tendencia de reducción del consumo energético de los componentes electrónicos hace que la relación entre funcionalidades ofrecidas, capacidad de las baterías y portabilidad permita una autonomía del orden de horas o días dependiendo de los servicios ofrecidos. Es en este ámbito en el que las políticas de gestión de energética sean lo más flexible posibles, con el objetivo de aumentar la autonomía.

3.1. Ordenador portátil

El caso particular de estudio lo constituye un ordenador portátil, convenientemente equipado para poder alimentarse de una placa fotovoltaica. En este contexto el sistema de gestión energética se encarga de gestionar el comportamiento de los principales componentes, en función del estado de la batería, de la posibilidad de conectarse a la red eléctrica o de utilización del generador fotovoltaico. La experimentación realizada en este caso de estudio está basada en el trabajo (Valdivieso-Sarabia et al., 2012).

La experimentación consiste en obtener 3 distribuciones eléctricas modificando ligeramente alguno de los parámetros que condicionan la toma de decisiones sobre la gestión de carga. En primer lugar se va a obtener la distribución deshabilitando la gestión de carga; en segundo lugar habilitando la gestión de carga en base al nivel de reserva mínimo de la batería; en tercer lugar se utiliza el criterio del consumo medio como desencadenante de la gestión de carga. Por último se comparan los resultados de cada una de las 3 estrategias con el fin de analizar el comportamiento y la idoneidad de cada una.



Descripción	Identificador	Potencia Máxima	Respeto medioambiental
Red eléctrica	F1	91,65 W	Bajo
Generador fotovoltaico	F2	25W	Alto

Tabla 6.21 Tabla resumen de los elementos generadores del portátil

Estableciendo el nivel de abstracción en el portátil, se considera la conexión a la red eléctrica y el generador fotovoltaico como agentes de tipo F , y consecuentemente con el tipo *agenteF* dentro del framework *fdSMADe*. Quedan identificadas por F1 y F2 respectivamente. La potencia máxima que la placa fotovoltaica es capaz de proporcionar en condiciones ideales es de 25W. En cambio, la potencia máxima de la conexión a la red eléctrica está determinada por las características del cargador del portátil, que en este caso es de unos 91,65W. La batería está representada por un agente de tipo T , siendo un *agenteT* dentro del framework *fdSMADe*. Tal y como muestra la tabla 6.22, la capacidad de la batería es de unos 63Wh y está identificada por T1.

Descripción	Identificador	Capacidad máxima
Batería	T1	63Wh

Tabla 6.22 Capacidad de la batería del portátil

Los principales componentes que se han tenido en cuenta a la hora de representar a los centros de consumo del portátil son: procesador, pantalla, disco duro, dos puertos USB y otro genérico que contiene al resto de componentes. El listado de los componentes considerados, así como su identificador y su demanda energética máxima, se muestra en la tabla 6.23.

Se establecen múltiples relaciones de suministro y consumo energético para cada elemento generador F_x , $T1$ y consumidor C_y , $T1$. La batería gracias a su doble rol, se comporta como generador y/o consumidor, de forma que la batería puede ser alimentada por el generador fotovoltaico y/o por la conexión a la red eléctrica. Todos los centros de consumo C_y se pueden abastecer o bien de la



batería o de la conexión con la red eléctrica. En cambio, el generador fotovoltaico únicamente puede suministrar energía a la batería. Esta información queda reflejada en tabla 6.24 donde se muestra la matriz de adyacencia que representa las relaciones binarias entre ellos.

Descripción	Identificador	Demanda energética
CPU	C1	25W
Pantalla	C2	5W
Disco duro	C3	4,8W
USB A	C4	5W
USB B	C5	5W
Otros	C6	4W

Tabla 6.23 Demanda energética de cada centro de consumo del portátil

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	T1
F1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
F2							✓
T1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Tabla 6.24 Relación binaria que representa el abastecimiento energético entre componentes generadores y consumidores

3.2. Arquitectura del sistema multiagente en el framework *pSMADÉ*

Los componentes detallados en la sección anterior se representan con instancias de los tipos de agente definidos a lo largo del modelo estructural y



tecnológico (capítulos 3 y 5) con el fin de obtener el sistema multiagente que permita gestionar la distribución eléctrica. Dicha correspondencia es común a la de los casos anteriores, por lo que se puede observar en la tabla 6.26 que es igual a la tabla 6.5, excepto porque se le ha añadido la fila del agente transpondedor. A continuación, en las siguientes tablas se detallan los valores de los parámetros de cada una de las instancias de agentes, que van a modelar el caso del portátil.

La tabla 6.26 muestra a los agentes encargados de representar a F1 y F2, identificados como FA1 y FA2 respectivamente. La función de cada parámetro ha sido explicada en los casos anteriores, por lo que únicamente se detalla el parámetro *condGestiónCarga*, que hace referencia a la condición de envío de solicitudes de reducción de consumo a los agentes consumidores.




Id caso de estudio	Modelo estructural	Modelo tecnológico	Entorno de prototipado	Id JADE
<i>Fx</i>	F	AgenteF		FAx
<i>Cy</i>	C	AgenteC		CAy
<i>Tz</i>	T	AgenteT		TAz
-	OG	AgenteOG	-	OGA1
-	SP	AgenteSP	-	SPA1
-	IU	AgenteIU	-	RMA
-	BA	AgenteBA	-	DFService
-	PM	AgentePM	-	PMA1

Tabla 6.25 Correspondencia entre componentes del caso de estudio y los modelos estructural, tecnológico fdSMADe y entorno de prototipado pSMADe



En este caso, se indican 3 valores 0, 1 y 2 con el fin de obtener 3 distribuciones energéticas, cada una con distintas políticas de reducción de consumo. El valor 0 indica que no se realiza gestión de carga, por lo que no se solicita reducción de consumo a los agente de tipo *CAY*; el valor 1 indica que las reducciones de consumo se desencadenan en cuanto el porcentaje de suministro del agente *FAX* sobrepasa al valor definido en *reservaMin*, y el valor 2 indica que se desencadenan en cuanto la demanda actual es superior a la media de generación anterior.

Parámetros agenteF	FA1	FA2
<i>potenciaNom (W)</i>	91,65	25
<i>tensión (V)</i>	19,5	12
<i>potenciaDisponiblet</i>		
<i>reservaMin (%)</i>	70	90
<i>costeUnitProd (€/kWh)</i>	0,14	0,1
<i>precioUnitVenta (€/kWh)</i>	0,16	0,12
<i>toxicidad</i>	10	2
<i>condGestionCarga</i>	0, 1, 2	0, 1, 2
<i>políticaReducción</i>	1	1
<i>nodoComputación</i>	local	local

Tabla 6.26 Valor de los parámetros de los agentes FA1 y FA2

La tabla 6.27 contiene los parámetros del agente medio de almacenamiento o batería, TA1. A continuación se explican aquellos parámetros de especial relevancia. El parámetro *estadoCarga* representa la evolución del estado de la batería, que varía en función de la distribución realizada. En este caso, se establece inicialmente cargada.



Parámetros agenteT	TA1
<i>capMax(Wh)</i>	63
<i>tensión (V)</i>	10,8
<i>estadoCarga</i>	Inicialmente cargado
<i>modosFunc</i>	1
<i>criterioElecciónProd</i>	(70, 30,0)
<i>tipoSolicitud</i>	2
<i>nodoComputación</i>	local
<i>reservaMin (%)</i>	60
<i>costeUnitProd (€/kWh)</i>	0,2
<i>precioUnitVenta (€/kWh)</i>	0,22
<i>toxicidad</i>	4
<i>condGestionCarga</i>	0, 1, 2
<i>políticaReducción</i>	2
<i>razónCarga(%)</i>	25
<i>razónDescarga(%)</i>	40
<i>numCiclosCargaDescarga</i>	1000
<i>ratioDescargaPorCiclo (%)</i>	0,01
<i>minSOC(%)</i>	5
<i>maxSOC(%)</i>	100
<i>impedancia</i>	-
<i>eficiencia(%)</i>	-

Tabla 6.27 Valor de los parámetros del TA1



El parámetro *modosFunc* refleja los distintos modos de funcionamiento que el agente tiene. En este caso, no es posible solicitar a la batería la reducción del consumo, por lo que se define un único modo de funcionamiento que no puede ser deshabilitado. El parámetro *criterioElecciónProd* está compuesto por la tripleta, en el que cada elemento es un factor de ponderación para valorar las características de los agentes fuente de energía. El primer componente pondera la característica del respeto medioambiental; el segundo el coste económico, y el tercero la capacidad de generación. En este caso, la batería prioriza el uso de agentes que tengan mayor respeto medioambiental.

El parámetro *tipoSolicitud* refleja el tipo de estrategia a la hora de solicitar suministro energético. La estrategia total, representada por el valor 1, solicita toda la energía necesaria a cada uno de los agentes fuente, en cambio la estrategia proporcional, representada por el valor 2, intenta repartir la carga entre todos los agente fuente de los que se puede abastecer. El parámetro *políticaReducción* tiene el valor 2 que indica que solicita al mayor número posible de agentes de tipo CAX que reduzcan lo mínimo posible. Se define el valor del 60% como *reservarMin* de la capacidad de la batería. Al igual que en el caso de los agentes FA1 y FA2, el parámetro *condGestionCarga* tiene 3 valores, para cada una de las soluciones a obtener.

Los parámetros que hacen alusión al comportamiento propio de la batería son *razónCarga* y *razónDescarga* que representa el porcentaje de la capacidad de la batería que puede ser cargado / descargado en una hora, se establece un valor de 25% y 40 %. Asimismo, el parámetro *numCiclosCargaDescarga* hace referencia a la vida útil de la batería, que en este caso, se ha establecido en 1000 ciclos de carga y descarga. De la misma forma, conforme se van consumiendo ciclos de carga/descarga la capacidad de la batería va disminuyendo. Este fenómeno lo representa el parámetro *ratioDescargaPorCiclo*, que se ha establecido en un 0,05%. Los siguientes parámetros hacen referencia al estado mínimo y máximo de la batería. Se denominan *minSOC* y *maxSOC*, estableciendo el valor de 5% y 100% respectivamente.

Los parámetros *impedancia* y *eficiencia* se utilizan únicamente para representar a líneas de transmisión y convertidores, respectivamente, por lo que en este ejemplo no se les asigna ningún valor.

La tabla 6.28 muestra los valores asignados a los parámetros de cada uno de los agentes CAY. El parámetro *potenciaRequerida* refleja la curva de carga que



presenta cada componente C_y . Este parámetro depende del tiempo, por lo que dichas curvas de carga se muestran en la figura 6.23.

El parámetro *modosFunc* refleja el número de modos de funcionamiento que el agente consumidor tiene. En posteriores tablas (tabla 6.29, tabla 6.30, tabla 6.31, tabla 6.32, tabla 6.33) se muestra el consumo de cada modo de funcionamiento y si es posible deshabilitarlo en el caso de que reciba una solicitud de reducción de consumo.

El parámetro *criterioElecciónProd* está compuesto por la tripleta, en el que cada elemento es un factor de ponderación para valorar las características de los agentes fuente de energía. En este caso, se otorga el mismo peso al respeto medioambiental y al coste económico.

Parámetros agenteC	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5	CA6
<i>potenciaMax (kW)</i>	25	4,8	5	2,5	2,5	4
<i>tensión (V)</i>	10,8					
<i>potencia requerida</i>	figura 6.23					
<i>modosFunc</i>	3	5	3	5	5	1
<i>criterioElección Prod</i>	(50, 50,0)	(50, 50,0)	(50,50,0)	(50, 50,0)	(50, 50,0)	(50, 50,0)
<i>tipoSolicitud</i>	2	2	2	2	2	2
<i>nodoComputación</i>	local	local	local	local	local	local

Tabla 6.28 Valor de los parámetros de los agentes CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 y CA6

El parámetro *tipoSolicitud* refleja el tipo de estrategia a la hora de solicitar suministro energético. Tiene asignado el valor 2, por lo que intenta repartir la carga entre todos los agente fuente de los que se puede abastecer.



Las siguientes tablas contienen los datos sobre los modos de funcionamiento de cada uno de los agentes CAY. El consumo energético de los modos de funcionamiento, que no son críticos, es adicional al consumo de los modos que son críticos. Entre los distintos agentes, cabe señalar a los agentes CA4 y CA5 que representan a los dos puertos USB, cuya principal característica es que no tienen ningún modo que sea crítico, por lo que su uso se puede deshabilitar por completo.

Modos funcionamiento CA1	Consumo (W)	Crítico
Rendimiento básico	8	1
Rendimiento Normal	7	0
Rendimiento Alto	10	0

Tabla 6.29 Modos de funcionamiento que caracterizan al procesador

Modos funcionamiento CA2	Consumo (W)	Crítico
Brillo nivel 1	2,16	1
Brillo nivel 2	0,66	0
Brillo nivel 3	0,66	0
Brillo nivel 4	0,66	0
Brillo nivel 5	0,66	0

Tabla 6.30 Modos de funcionamiento que caracterizan a la pantalla



Modos funcionamiento CA3	Consumo (W)	Crítico
Velocidad rotación mínima	0,6	1
Velocidad rotación media	0,2	0
Velocidad rotación máxima	1,3	0

Tabla 6.31 Modos de funcionamiento que caracterizan al disco duro

Modos funcionamiento CA4 y CA5	Consumo (W)	Crítico
Potencia mínima	0,5	0
Potencia baja	0,5	0
Potencia media	0,5	0
Potencia alta	0,5	0
Potencia máxima	0,5	0

Tabla 6.32 Modos de funcionamiento que caracterizan al puerto USB A y B

Modos funcionamiento CA6	Consumo (W)	Crítico
Funcionamiento normal	4	1

Tabla 6.33 Modos de funcionamiento que caracterizan al resto de componentes del ordenador portátil

Respecto al valor de los parámetros de los agentes **AgenteOG**, **AgenteSP** y **AgentePM**, se pueden observar en las tablas: tabla 6.34, tabla 6.35 y tabla 6.36.



Parámetros OGA	OGA1
<i>tDisponibleComp (s)</i>	60
<i>criterioEcológico</i>	<1,50>
<i>criterioEconómico</i>	<2,30>
<i>criterioSatisfaccion</i>	<3, 20>

Tabla 6.34 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de optimización global OGA1

El agente OGA1 está configurado para utilizar un tiempo máximo de 60 segundos para buscar una solución que mejore la anterior. La solución óptima está orientada a ponderar con un 50% el respeto medioambiental gracias al uso de las fuentes de energía renovables, otorgando un 30% de peso al bajo coste del kw/h y un 20% a la satisfacción del usuario, de forma que la reducción de consumo por parte de los centros de consumo, no penalice la bondad de la solución. Los valores del agente OGA1 se pueden ver en la tabla 6.34.

Parámetros SPA	SPA1
<i>duración (h)</i>	12
<i>pasoSimulación(s)</i>	3600

Tabla 6.35 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de simulación de potencia SPA1

El agente SPA1 está configurado para simular el consumo y la generación durante 12h. Se establecen pasos de simulación de una hora de duración, ejecutando en cada paso de la simulación, la gestión de la distribución eléctrica. Los valores asociados a este agente se pueden ver en la tabla 6.35.

El agente PMA1 está configurado para obtener datos climatológicos, de la ciudad de Alicante, para el día 15 de mayo, durante 12 horas. Esto se puede observar en la tabla 6.36.



Parámetros PMA	PMA1
<i>latitud</i>	38.3452
<i>longitud</i>	-0.481006
<i>fecha inicio</i>	15 mayo (8:00)
<i>fecha fin</i>	15 mayo (20:00)

Tabla 6.36 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de predicción meteorológica PMA1

3.3. Capacidad de generación y requerimientos energéticos

Las fuentes de energía que no dependen de las condiciones climáticas son capaces de suministrar, en caso de que sea necesario, una potencia eléctrica cercana a su potencia nominal, siempre y cuando no ocurra ninguna incidencia.

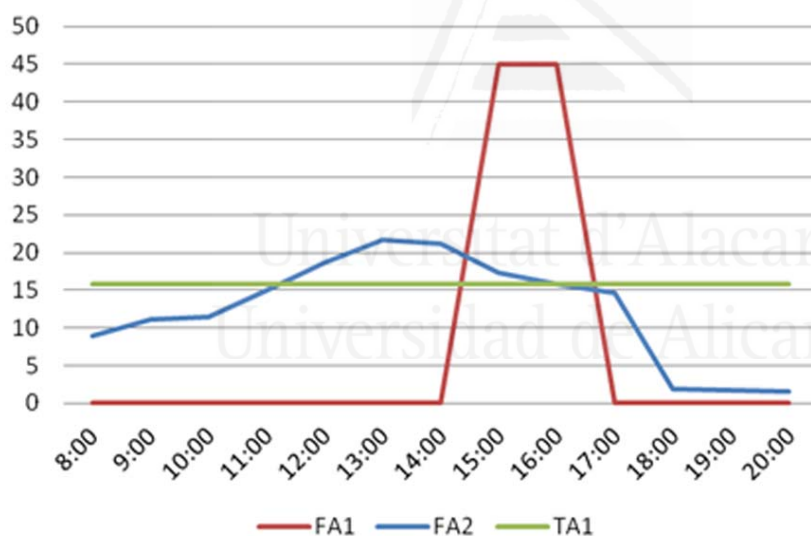


Figura 6.22 Curvas de generación máxima de los agentes FA1, FA2 y TA1



El agente FA1 es capaz de suministrar toda la energía eléctrica que sea necesaria, por lo que para la experimentación se ha elegido un valor arbitrario suficientemente alto como para que sea capaz de satisfacer a todos los centros de consumo. El agente FA1 representa al cargador que se conecta a la red eléctrica convencional. En el caso de estudio se asume que no es posible conectar el cargador, ya que la persona que lo transporta está en movimiento, por lo que únicamente es posible conectarlo a la red eléctrica durante 2 horas, de 15:00 – 17:00. La producción del agente FA2 depende de las condiciones climáticas y se ha calculado tal y como se ha descrito en el capítulo 5. La tercera curva, que aparece, se corresponde con la del agente TA1, que representa a la batería y muestra una línea constante al 25% de su capacidad máxima. La batería solamente es capaz de proporcionar dicha potencia mientras su capacidad no descienda del 25% de su capacidad máxima. Por lo que hasta que no se realice la distribución, no se podrá ver la evolución de la capacidad máxima de suministro de la batería. Las curvas de generación máxima de cada uno de los agentes fuentes y transpondedor se pueden observar en la figura 6.22.

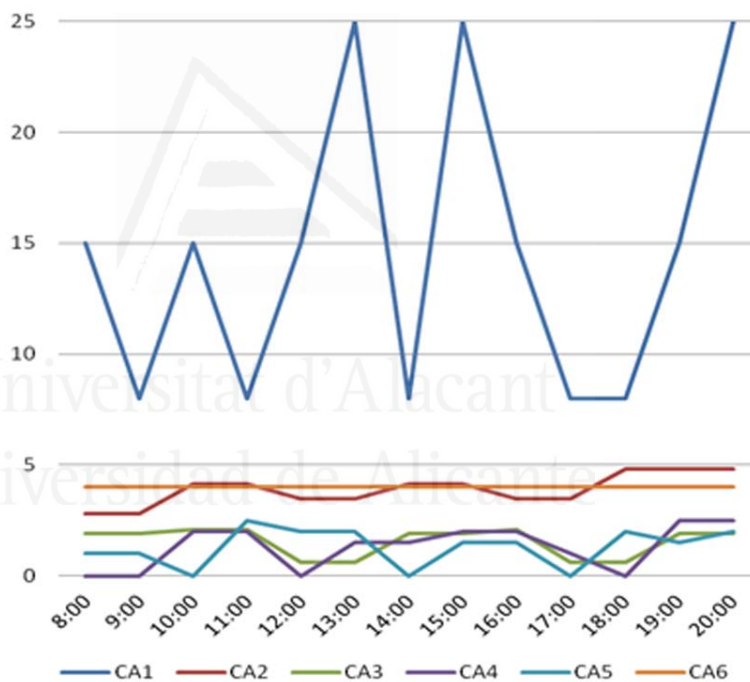


Figura 6.23 Curvas de carga de los agentes CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 y CA6



Los requerimientos energéticos de cada uno de los agentes CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 y CA6 se han simulado para un periodo de 12 horas. Las correspondientes curvas de carga se muestra en la figura 6.23, donde se aprecia que el procesador es el que mayor consumo presenta, alcanzando picos de 25W. El resto de componentes presentan un consumo por debajo de los 5W.

3.4. Distribución eléctrica deshabilitando la gestión de carga

Una vez que se ha mostrado la capacidad máxima de generación y los requerimientos energéticos, se procede a mostrar los resultados obtenidos de la gestión de la distribución eléctrica sin realizar gestión de carga. En dichos resultados se muestra la potencia eléctrica suministrada por cada agente FA1, FA2 y TA1 hacia los agentes TA1 y CAY. Al igual que ocurre en los casos de estudio anteriores la potencia distribuida por los agentes FAX no tiene porqué corresponderse con la potencia máxima que son capaces de suministrar en cada periodo de tiempo. Igualmente, la potencia requerida por cada CAY, puede que no haya sido suministrada totalmente si no hay suficiente potencia, ya que no es posible disminuir su consumo energético.

3.4.1. Suministro a agentes CAY

La figura 6.24 muestra el consumo energético a lo largo de las 12 horas de los agentes CA1, CA2, CA3 CA4, CA y CA6, indicando el agente que suministra la energía solicitada y los periodos en que ha sido necesario apagar el portátil por la falta de suministro eléctrico. Analizando dicha figura, se puede apreciar como los agentes CAY consumen principalmente del agente TA1 y solamente durante dos horas 15:00 y 16:00 del agente FA1, debido a que es el único periodo en que está disponible la conexión a la red eléctrica. Ninguno de los componentes ha recibido suministro eléctrico durante 3 horas, 12:00, 13:00 y 20:00, ya que el estado de carga de la batería, ver figura 6.25, no es capaz de suministrar la potencia requerida por todos los componentes considerados en conjunto. En este caso, si no se puede satisfacer a todos, no se suministra a ninguno.

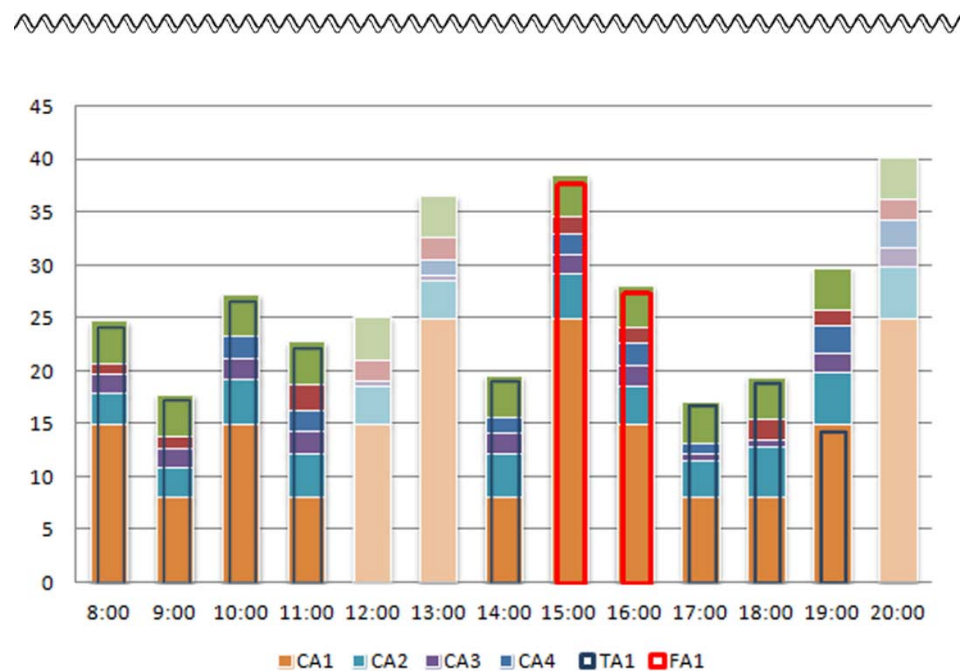


Figura 6.24 Procedencia de la energía consumida por cada agente CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 y CA6

3.4.2. Estado de carga del agente TA1

El estado de carga de la batería representada por el agente TA1, se puede observar en la figura 6.25. Además, se muestra la energía aportada por FA2 para cargarse y la suministrada a los agentes CAY, que consecuentemente la descargan.

El estado inicial de la batería es del 100% de su capacidad, y se puede observar como su capacidad va descendiendo de forma prácticamente lineal, hasta las 12:00, ya que suministra más energía de la que recibe de FA2. Durante 2 horas, 12:00 y 13:00 no suministra energía a CAY, debido a que la demanda es mayor que la energía disponible en la batería. A las 14:00, el estado de la batería, si que permite suministrar a CAY, pero a las 15:00 deja de suministrar, a favor de FA1. Este hecho permite que la batería se cargue alcanzando el 100% de su capacidad a las 17:00. A partir de las 17:00 la batería vuelve a suministrar a CAY. Este hecho unido a la baja producción de FA2, repercute en una disminución de la capacidad de la batería, de forma que a las 20:00 no es capaz de soportar la carga de CAY.



Durante el periodo de 12:00 a 16:00, FA2 alcanza el ratio máximo de carga, definido como un 25% de la capacidad máxima, 15,75Wh.

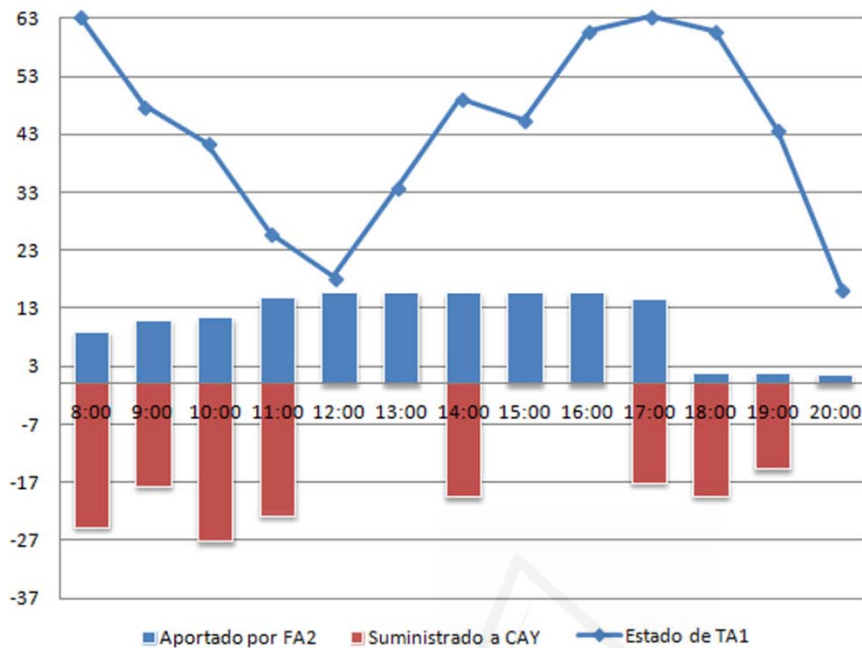


Figura 6.25 Evolución del estado de carga de la batería

3.4.3. Producción de agentes FA1 y FA2

Las graficas representadas en la figura 6.26 y figura 6.27 muestran la capacidad máxima de generación de cada uno de los agentes FA1 y FA2, y la energía suministrada a CAY y a TA1, respectivamente.

La figura 6.26 muestra la capacidad máxima de generación del agente FA1 y la energía requerida por los agentes CAY. El agente FA1 únicamente es capaz de suministrar energía durante dos horas, 15:00 y 16:00 pero dicha capacidad máxima es menor que los requerimientos de CAY, por lo que existe un excedente que no se aprovecha. Dicho excedente no es posible destinarlo a cargar TA1, ya que FA2 está suministrando el máximo permitido por el ratio máximo de carga definido en un 25% de la capacidad de la batería.

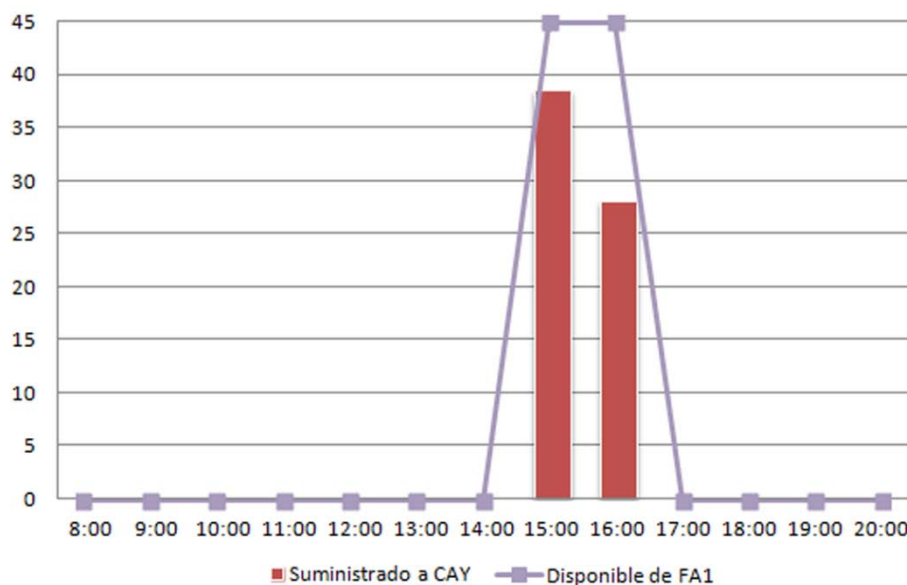


Figura 6.26 Capacidad de suministro del agente FA1 y potencia suministrada a CAY

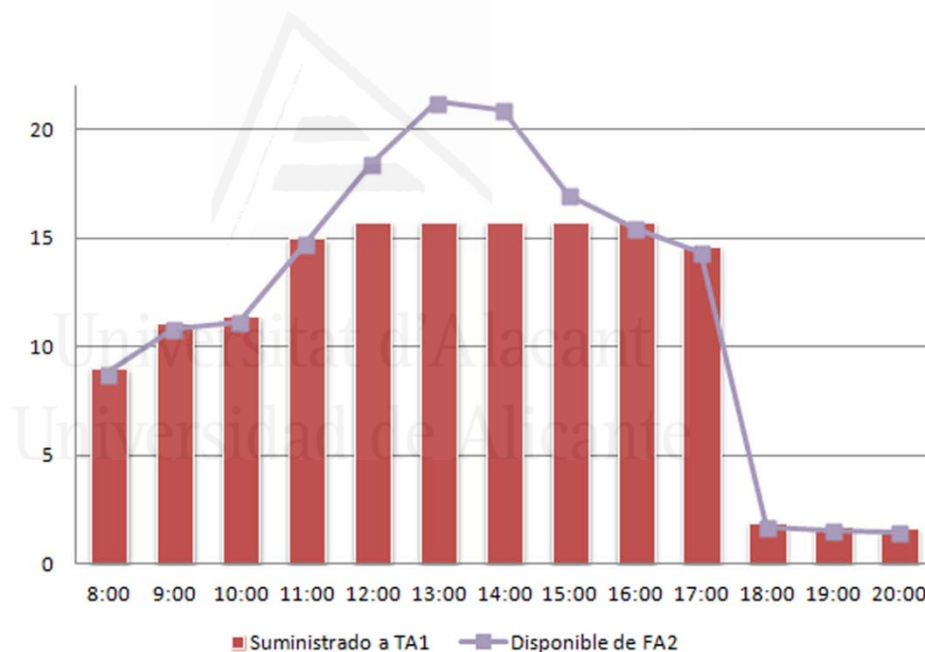


Figura 6.27 Capacidad de suministro del agente FA2 y potencia suministrada al agente TA1



La figura 6.27 detalla la energía suministrada por FA2 para cargar a TA1. Toda la energía generada está destinada a cargar TA1, excepto durante el periodo 12:00 – 16:00, en el cual la batería no es capaz de absorber toda la energía generada por FA2, debido al ratio máximo de carga, por lo que ese excedente no se utiliza con ningún otro propósito. Esto se debe a la arquitectura del sistema propuesto no permite que FA2 alimente directamente a ninguno de los agentes CAY. Los agentes CAY pueden alimentarse a través de FA1 o de TA1.

3.5. Distribución eléctrica con gestión de carga disparada al alcanzar el nivel de reserva mínima

La distribución energética que se muestra a continuación es una variante de la obtenida anteriormente. En este caso, se ha habilitado la gestión de carga, de forma que se pueda solicitar a los agentes CAY que reduzcan su consumo energético. El criterio que decide cuando solicitar a un agente CAY que reduzca su consumo es el del nivel de reserva mínima de la batería. De esta forma, cuando el estado de la batería desciende de un porcentaje definido de su capacidad máxima, denominado nivel de reserva mínima, se solicita a los agentes CAY que reduzcan su consumo, con el fin de prolongar la autonomía de la batería. Tal y como se ha definido en la tabla 6.27, el nivel de reserva mínima es del 60% de su capacidad.

3.5.1. Suministro a agentes CAY

La figura 6.28 muestra el consumo energético a lo largo del tiempo de simulación de los agentes CA1, CA2, CA3 CA4, CA y CA6, indicando el agente que suministra la energía solicitada, la energía requerida inicialmente por los agentes CAY en conjunto y la que finalmente han obtenido. Analizando los datos, se puede apreciar como los agentes CAY consumen principalmente del agente TA1 y solamente durante dos horas 15:00 y 16:00 del agente FA1, ya que es el único periodo en que está disponible la conexión a la red eléctrica. Se han efectuado reducciones de consumo, deshabilitando algunos de los modos de funcionamiento de agente CAY que no son críticos, durante 8 horas 9:00, 10:00,



11:00, 12:00, 13:00, 14:00, 19:00 y 20:00. La política de reducción de consumo ha permitido mantener el portátil encendido durante las 12 horas, sin tener que apagarlo por falta de suministro.

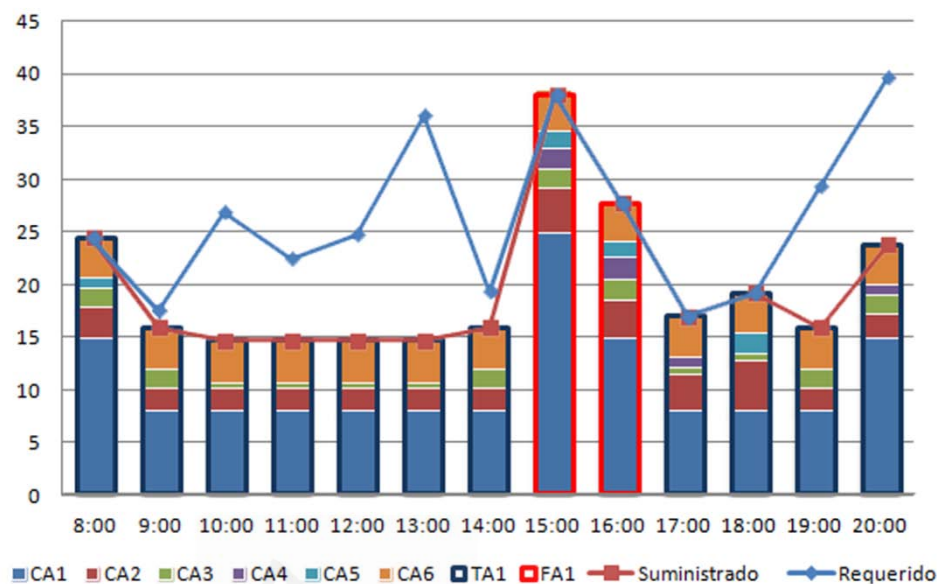


Figura 6.28 Procedencia de la energía consumida por cada agente CAY

3.5.2. Estado de carga del agente TA1

El estado de carga de la batería representada por el agente TA1, se puede observar en la figura 6.29. Además, se muestra la energía aportada por FA2 para cargarse y la suministrada a los agentes CAY.

El estado inicial de la batería es del 100% de su capacidad, y se puede observar como su capacidad va descendiendo de forma prácticamente lineal, pero con una pendiente menor que en el caso anterior, hasta las 11:00, ya que la diferencia entre la energía suministrada y recibida de FA2 es menor. Desde las 12:00 hasta las 15:00 el estado de la batería es casi constante, debido a que las reducciones de consumo hacen que la energía suministrada sea equivalente a la recibida. A las 15:00 deja de suministrar, a favor de FA1. Este hecho permite que la batería se cargue alcanzando el 100% de su capacidad a las 17:00. A partir de las



17:00 la batería vuelve a suministrar a CAY. Esto unido a la baja producción de FA2, repercute en una disminución de la capacidad de la batería, pero siendo capaz de soportar la carga de CAY a las 20:00. Respecto a la carga de la batería por parte de FA2, es idéntico al del caso en el que no tiene habilitado la gestión de carga.

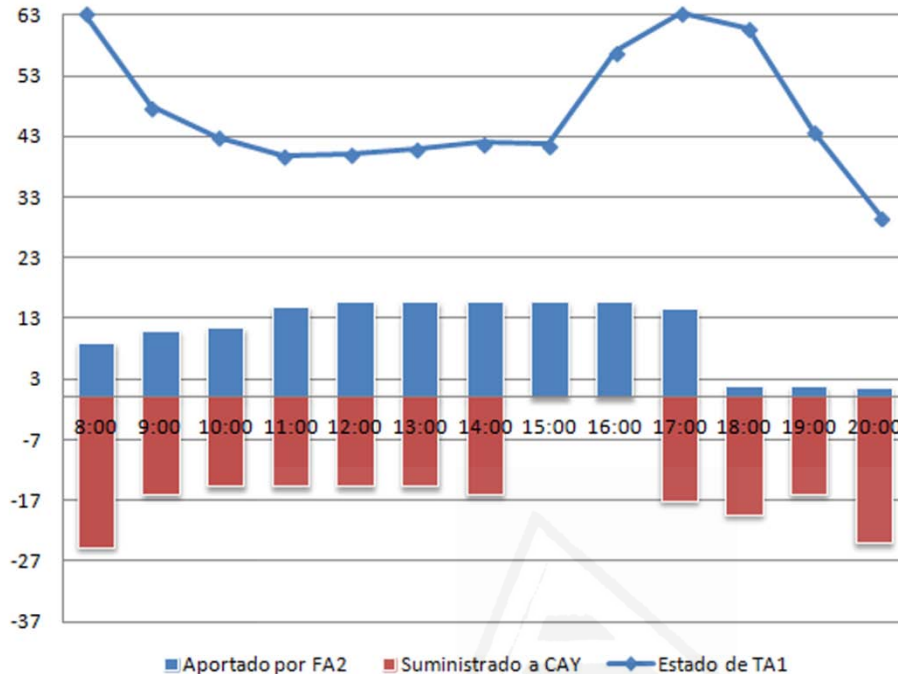


Figura 6.29 Evolución del estado de carga de la batería

3.5.3. Producción de agentes FA1 y FA2

Las gráficas mostradas en la figura 6.30 y figura 6.31 muestran la capacidad máxima de generación de cada uno de los agentes FA1 y FA2, y la energía suministrada a CAY y a TA1, respectivamente. Los datos mostrados por la figura 6.30 y figura 6.31 son exactamente los mismos que los obtenidos en el caso anterior, mostrados en la figura 6.26 y figura 6.27. Esto se debe a que FA1 suministra toda la energía requerida por CAY, porque en ese periodo de tiempo no se realiza gestión de carga. Por su parte, el agente FA2 dedica toda su producción a cargar FA1.

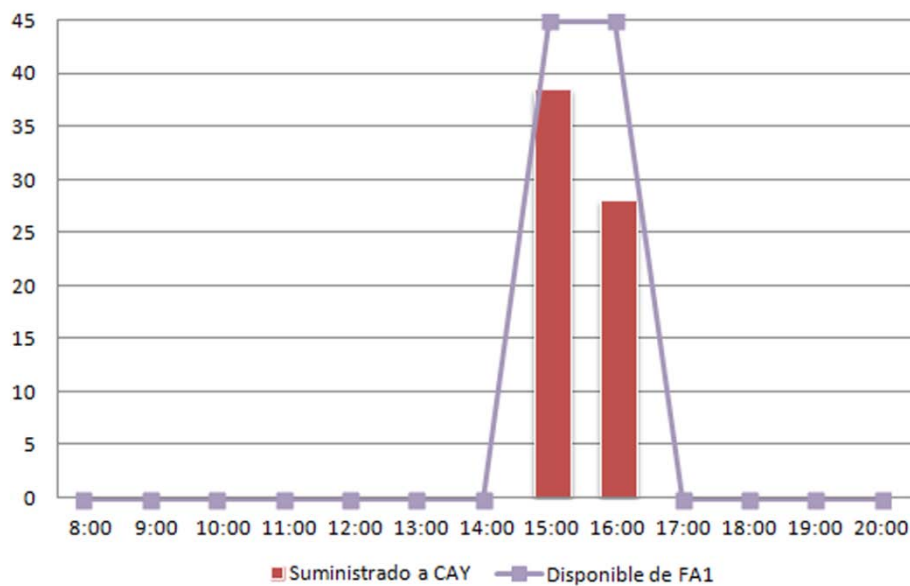


Figura 6.30 Capacidad de suministro del agente FA1 y potencia suministrada a los agentes CAY

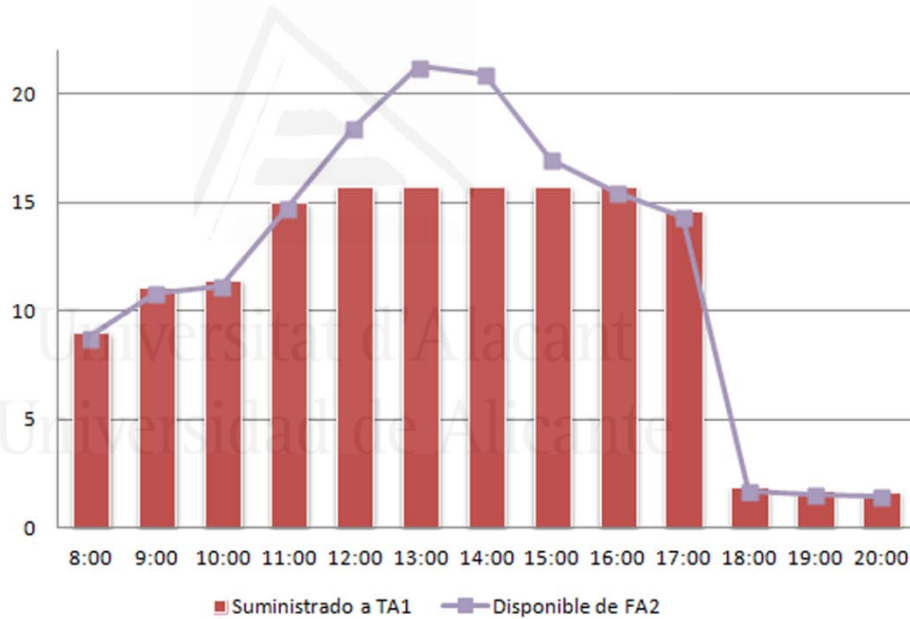


Figura 6.31 Capacidad de suministro del agente FA2 y potencia suministrada al agente TA1



3.6. Distribución eléctrica con gestión de carga disparada al superar la media de consumo

Esta variante, también hace uso de la gestión de carga para prolongar el tiempo de uso de la batería. La distribución energética que se muestra a continuación es una variante de la obtenida anteriormente, que en este caso utiliza otro criterio para decidir cuándo enviar solicitudes de reducción de consumo. El criterio utilizado es el del consumo medio. Cuando TA1, FA1 o FA2 reciben solicitudes de energía superiores a la media de la energía suministrada anteriormente, se solicita a los agentes CAY que reduzcan su consumo, con el fin de mantener el consumo medio.

3.6.1. Suministro a agentes CAY

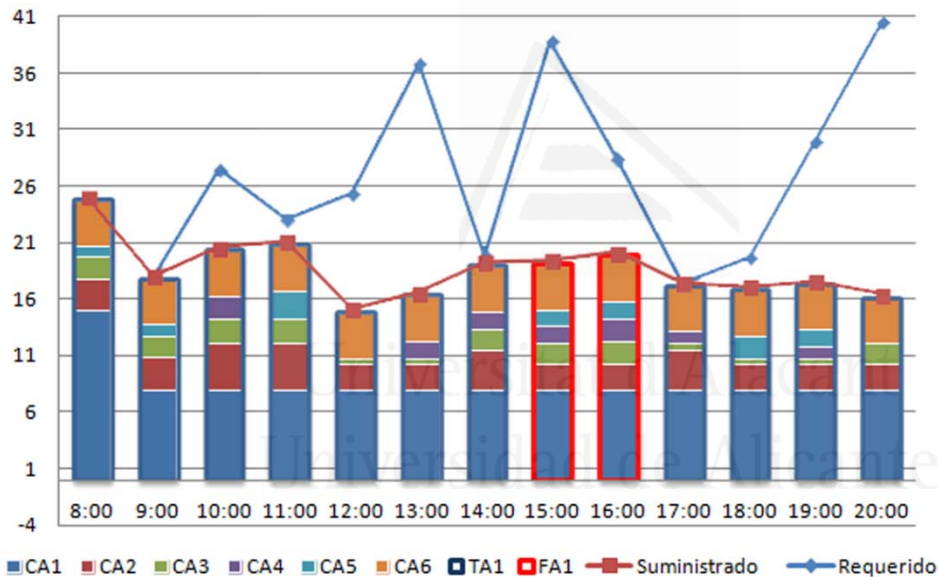


Figura 6.32 Procedencia de la energía consumida por cada agente CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 y CA6



La figura 6.32 muestra el consumo energético de los agentes CA1, CA2, CA3 CA4, CA y CA6, indicando el agente que suministra la energía solicitada, la energía requerida inicialmente por los agentes CAY en conjunto y la que finalmente han obtenido. Analizando los datos, se puede apreciar como los agentes CAY consumen principalmente del agente TA1 y solamente durante dos horas 15:00 y 16:00 del agente FA1, ya que es el único periodo en que está disponible la conexión a la red eléctrica. Se han efectuado reducciones de consumo, deshabilitando algunos de los modos de funcionamiento de agente CAY que no son críticos, durante 9 horas: 10:00, 11:00, 12:00, 13:00, 15:00, 16:00, 18:00, 19:00 y 20:00. En este caso, los agentes CAY han reducido su consumo 1 hora más que en el caso de nivel de reserva mínima, y además en el periodo en que FA1 alimenta a CAY, también se realiza la reducción de consumo, lo que repercute en que el consumo total de CAY sea prácticamente constante a lo largo de las 12 horas. Al igual que en el caso anterior, la política de reducción de consumo ha permitido mantener el portátil encendido durante las 12 horas, sin tener que apagarlo debido a la falta de suministro.

3.6.2. Estado de carga del agente TA1

El estado de carga de la batería representada por el agente TA1, se puede observar en la figura 6.33. Además, se muestra la energía aportada por FA2 para cargarse y la suministrada a los agentes CAY.

El estado inicial de la batería es del 100% de su capacidad, y se puede observar como su capacidad va descendiendo de forma prácticamente lineal, pero con una pendiente ligeramente superior a la del caso anterior, hasta las 12:00. Esto se debe a que durante la primera hora, no hay datos para calcular la media de consumo, por lo que hay que esperar hasta la segunda hora, para poder utilizar este criterio de reducción de consumo. Esto hace que la primera reducción de consumo se realice a las 10:00, mientras que en el caso anterior, se realizaba a las 9:00. Desde las 12:00 hasta las 15:00 el estado de la batería es prácticamente constante, ya que las reducciones de consumo hacen que la energía suministrada sea equivalente a la recibida. A las 15:00 deja de suministrar, a favor de FA1. Este hecho permite que la batería se cargue aunque sin alcanzar el 100%, tal y como ocurría en los casos anteriores a las 17:00. A partir de las 17:00 la batería vuelve a suministrar a CAY. Esto unido a la baja producción de FA2, repercute en una



disminución de la capacidad de la batería, pero siendo capaz de soportar la carga de CAY a las 20:00. Respecto a la carga de la batería por parte de FA2, es idéntico al del caso que no tiene habilitado la gestión de carga.

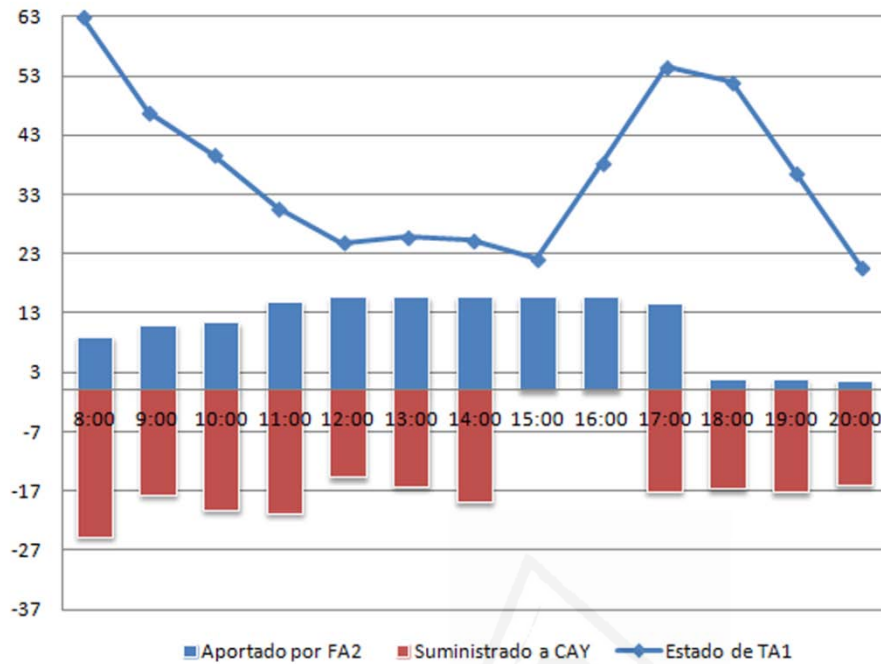


Figura 6.33 Evolución del estado de carga de la batería

3.6.3. Producción de agentes FA1 y FA2

Las gráficas mostradas en la figura 6.34 y figura 6.35 reflejan la capacidad máxima de generación de cada uno de los agentes FA1 y FA2, y la energía suministrada a CAY y a TA1, respectivamente. Los datos mostrados por la figura 6.35 son exactamente los mismos que los obtenidos en los casos anteriores, mostrados en la figura 6.27 y la figura 6.31. Esto se debe a que el agente FA2 dedica toda su producción a cargar FA1. En cambio, la figura 6.34 refleja la disminución de la energía suministrada por FA1 a CAY, respecto de los dos casos anteriores que se muestran en la figura 6.26 y la figura 6.34. Esta disminución se debe a las reducción de consumo realizada por los agente CAY durante las horas 15:00 y 16:00.

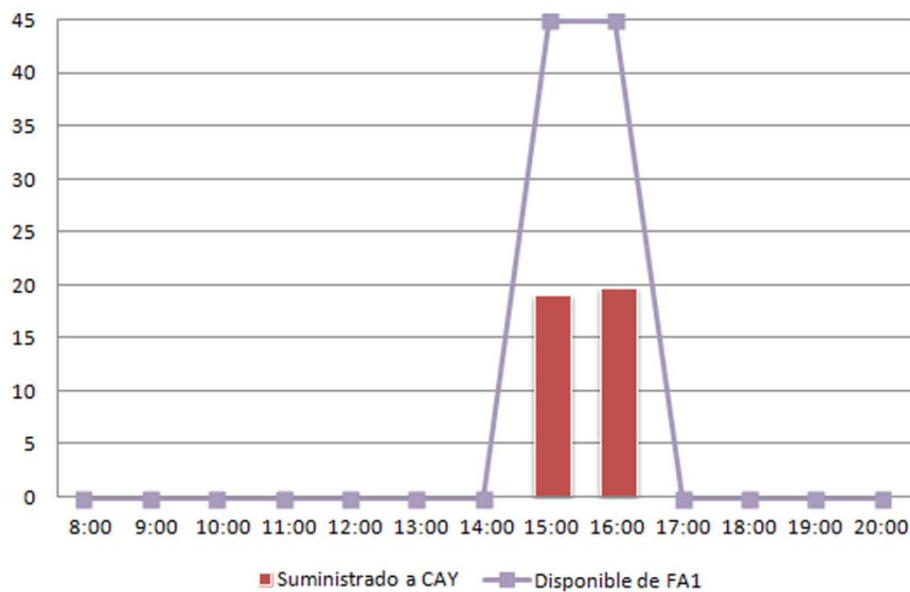


Figura 6.34 Capacidad de suministro del agente FA1 y potencia suministrada a los agentes CAY

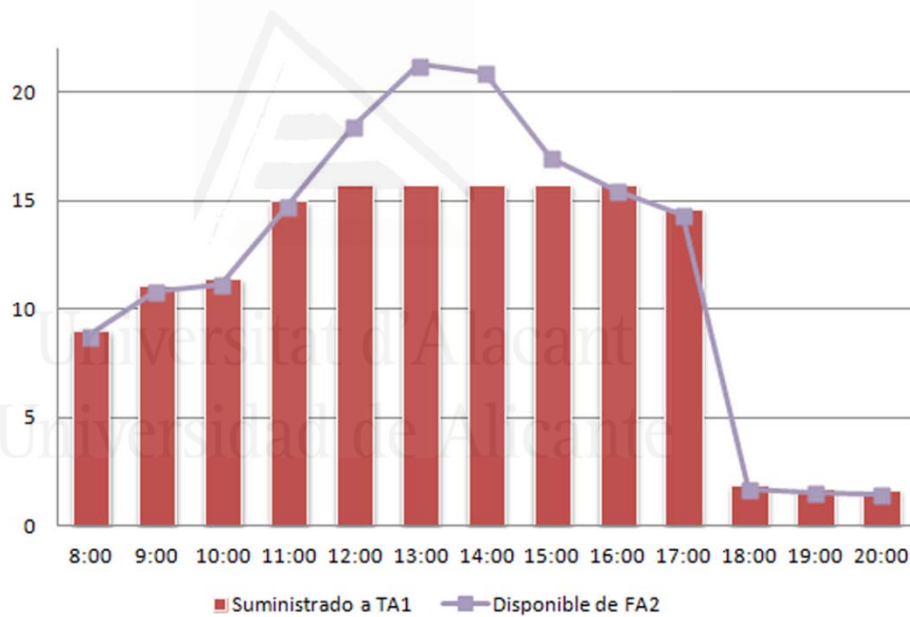


Figura 6.35 Capacidad de suministro del agente FA2 y potencia suministrada al agente TA1



3.7. Comparativa entre las tres estrategias de distribución

Una vez que se han detallado las estrategias de distribución eléctrica: sin gestión de carga, con gestión de carga en función del nivel de reserva mínimo y con gestión de carga en función del consumo medio, se procede a comparar las características de cada una de ellas.

En primer lugar, se procede a analizar los datos de la energía requerida por los agentes CAY y la suministrada de forma conjunta en cada estrategia mostrando su correspondiente tendencia lineal. Estos datos se muestran en la figura 6.36.

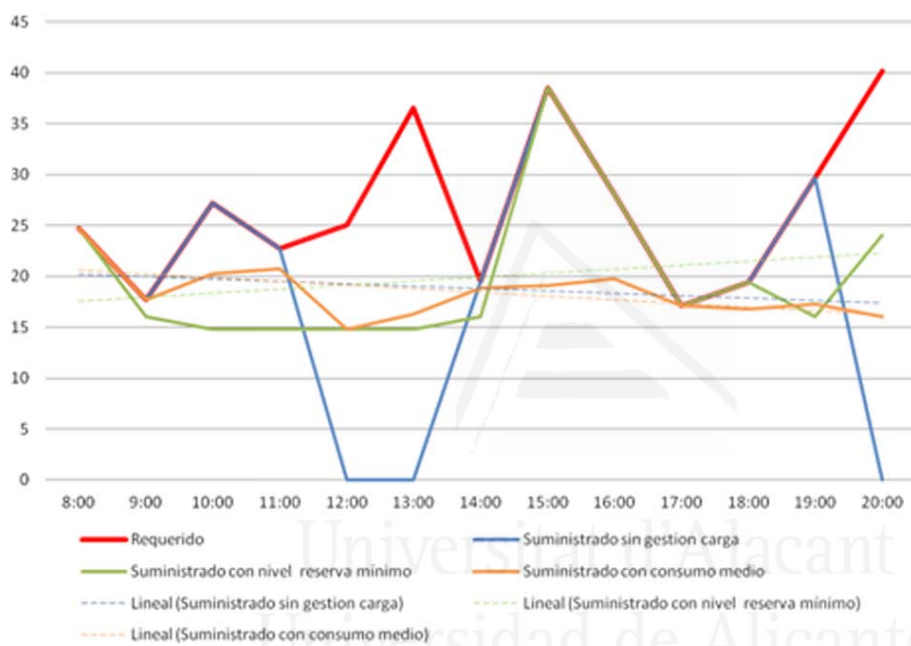


Figura 6.36 Análisis de la energía requerida por los agentes CAY, la aportada en cada estrategia y la tendencia de cada estrategia

La primera estrategia, que no utiliza gestión de carga, proporciona toda la potencia requerida por los agentes CAY. Hecho que mantiene la satisfacción del usuario, ya que no se ve limitado el uso del portátil y que por contra hace que se tenga que apagar durante 3 horas. Apagar completamente el portátil puede llegar



a ser incluso más molesto que limitar su uso. Esta acción tan extrema en cambio no ocurre en las otras dos estrategias que integran gestión de carga.

La diferencia entre la segunda y tercera estrategia, está en el número de veces que se aplica y el grado de reducción de consumo en cada una de ellas. La segunda estrategia aplica la reducción en 8 ocasiones, pero reduce el consumo en mayor grado que la tercera estrategia, tal y como se puede ver durante el periodo de 9:00 – 14:00. La tercera estrategia aplica la reducción de consumo en 9 ocasiones aunque en líneas generales lo hace de forma menos restrictiva que en la segunda estrategia. Otra diferencia es que durante el periodo que CAY está siendo alimentado por FA1, también aplica la reducción de consumo, independientemente del estado de la batería.

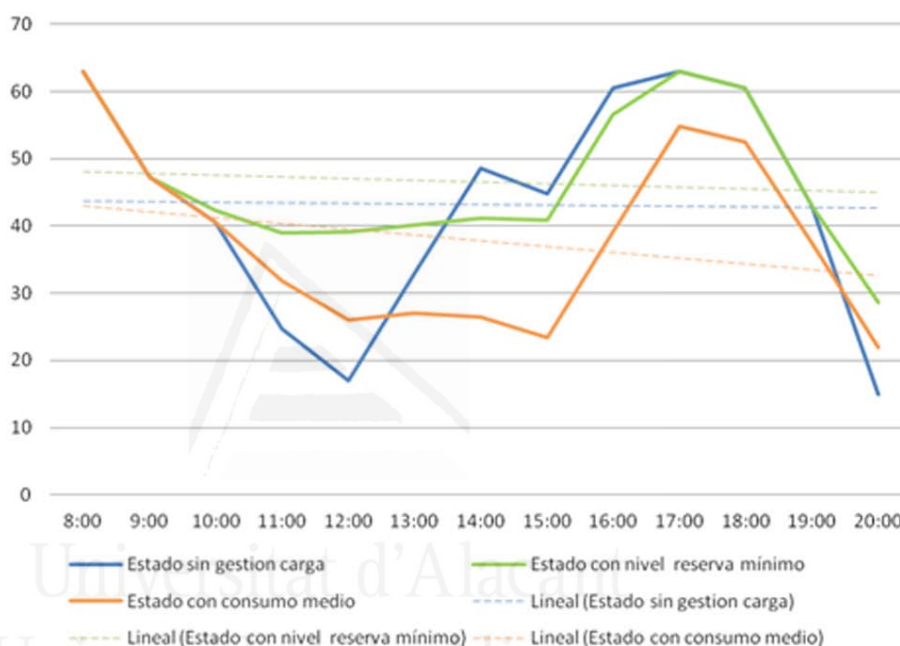


Figura 6.37 Análisis de la evolución del estado de carga de la batería en cada estrategia y su correspondiente tendencia

Respecto a las líneas de tendencia, las correspondientes a la primera y tercera estrategia son similares, siendo la tercera la que presenta un consumo ligeramente inferior a la estrategia que no aplica gestión de carga desde 13:00 a 20:00. Sin embargo, entre la segunda y tercera estrategia, se observa una mayor



diferencia a partir de la 13:00, debido principalmente a que la segunda estrategia no realiza gestión de carga mientras CAY se alimenta de FA1, lo que permite que el consumo energético durante la última mitad del periodo aumente respecto a la tercera estrategia.

Se aprecia como la tercera estrategia mantiene el consumo constante con el fin de evitar picos de consumo incluso cuando no se está alimentando de la batería. En cambio, la segunda estrategia reduce el consumo de forma más significativa cuando se utiliza la batería, pero cuando el suministrador es el cargador conectado a la red eléctrica, obtiene toda la energía requerida, lo que aumenta la satisfacción del usuario al no limitar el uso del portátil, a costa del coste económico de dicho suministro.

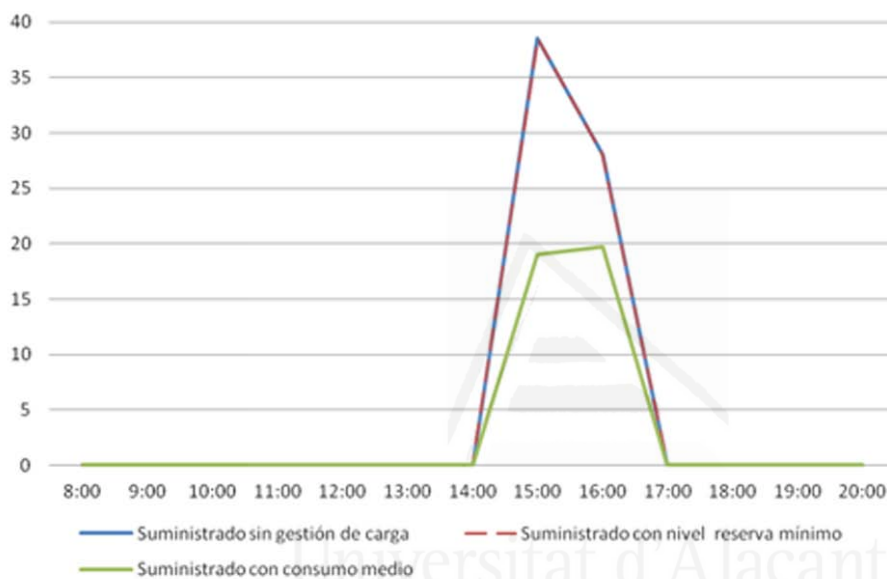


Figura 6.38 Análisis de la evolución de la producción de FA1 en cada estrategia

La figura 6.37 muestra el estado de carga de la batería al aplicar cada una de las tres estrategias. En las tres estrategias la evolución del estado de carga sigue un patrón de comportamiento similar aunque con distintos máximos y mínimos. La primera estrategia es la que presenta los menores mínimos a las 12:00 y 20:00 y una mayor variación entre su mínimo y máximo absolutos. En cambio, las estrategias segunda y tercera presentan una diferencia menor entre su mínimo y máximo absoluto. La segunda estrategia al aplicar reducciones de consumo más



severas, preserva el estado de la batería en mayor medida que la tercera estrategia.

Por último, se procede a comparar la aportación de los agentes FA1 y FA2 en cada estrategia de distribución. Tal y como muestra la figura 6.38, la producción de FA1 es exactamente la misma en la primera y segunda estrategia ya que no se aplica reducción de consumo. Sin embargo, como la tercera estrategia sí que aplica reducción de consumo, se puede ver como la aportación de FA1 es prácticamente la mitad que en las otras estrategias.

No se muestra la figura correspondiente a la comparativa de la producción de FA2, debido a que coincide en las tres estrategias. Esta coincidencia hace patente que todas ellas hacen el máximo uso del cargador fotovoltaico.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Referencias

- (Ackermann et al., 2001) Ackermann, T., Andersson, G. and Söder, L. (2001) Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, 57, 195-204.
- (Ackermann and Knyazkin, 2002) Ackermann, T. and Knyazkin, V. (2002) Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*.
- (Farhangi, 2010) Farhangi, H. (2010) The path of the smart grid. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 8, 18-28.
- (IDAE, 2009) IDAE (2009) Informe anual de consumos energéticos. Año 2009. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE).
- (Jenkins et al., 2000) Jenkins, N., Allan, R., Crossley, P., Kirschen, D. and Strbac, G. (2000) *Embedded Generation*, Institution of Electrical Engineers. 9780852967744.
- (Lasseter and Paigi, 2004) Lasseter, R. H. and Paigi, P. (2004) Microgrid: a conceptual solution. *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*.
- (Pepermans et al., 2005) Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R. and D'haeseleer, W. (2005) Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 33, 787-798.



(Valdivieso-Sarabia and Garcia-Chamizo, 2012) Valdivieso-Sarabia, R. J. and Garcia-Chamizo, J. M. (2012) Power Management Strategies based on Multi-Agent Systems for Portable Devices Equipped with Renewable Power Sources: Laptop Case Study. *Sustainable ICTs and Management Systems for Green Computing*. IGI Global.

(Valdivieso-Sarabia et al., 2012) Valdivieso-Sarabia, R. J., Ferrandez-Pastor, F. J. and Garcia-Chamizo, J. M. (2012) Distributed Optimization of Finite Resource Planning for Asynchronous and Non-linear Systems: Application to Power Management. IN Demazeau, Y., Muller, J. P., Rodriguez, J. M. C. and Perez, J. B. (Eds.) *Advances on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*. Springer Berlin Heidelberg.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Capítulo siete

Conclusions

The research conducted connects the formal model, based on correctness, and the experimental application, supported by simulation. The link between theory and technological pragmatism is constituted by the methodology used, which gives the necessary guarantees of developing, while provides the platform for its future development.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



1. Contributions

This research addresses the problem of electricity distribution on heterogeneous networks (subnets supporting different voltage), with several energy sources (hydro-power, wind-power, sun-power, etc.), multiple transmission media (transmission lines, storage devices, converters) and various consumption centres (buildings, houses, washing machines, laptops, mobile phones), using sustainable criteria that exploit the benefits of renewable energy sources.

Management systems of electrical distribution are designed and developed according to the specific characteristics of the system to manage. This means that management strategies are defined in a particular way for each case, usually characterized by a lack of dynamism to changes or impacts in the environment. Moreover, the lack of compatibility between management systems on different contexts limits the coordination among them. Computing performance is a relevant factor depending on size of the problem, since the distribution paths has an exponential growth due to the number of nodes. The aspects of universality and scalability require special attention in electrical distribution problems precisely by its inherent nonlinearity. Hence the importance of formal correctness and methodological consistency to achieve proposals that is compatible with strongly practical nature of these problems.

This proposal has been settle on a solution that is based on the formal modelling of the electrical networks, providing empirical verification at successive levels, from the simulation on software prototypes to potential experimentation with electronic prototypes, which will make sense validate on demand due to its cost.

The state of the art review addresses the multi-agent system modelling that can be applied into electricity distribution techniques. The existing models of multi-agent systems do not provide the recursive composition of agents. The techniques of electrical management are context-aware. The contexts can be distinguished among: electricity grids, neighbourhoods, buildings, homes, vehicles, mobile robotics, electrical appliances and portable electronic devices. In all solutions analysed are noticed the difficulty of being generic enough since solutions are aimed to meet the intrinsic requirements of the problem. In order to obtain sufficiently generic solutions, it is needed to use methodologies and multi-agent system models with sufficient expressive power.



Problem formulation uses the constituent elements of the networks that allow the generation, transport, storage and consumption. The distributed and related nature of such systems makes set and graph theory suitable for representing this kind of systems. Nodes represent components that use electricity. This produces a simple representation in which the adjacency matrix represents the power transmission opportunity, and the requirements matrix contains the capabilities of generation or consumption of each node.

The proposed solution to the problem of electrical management makes use of a generic distribution model consisting of several energy sources, consumption centres and multiple heterogeneous transmission media. The requirements of the proposed solution are: generality, flexibility, scalability, dynamism, fault tolerance, sustainability, proactivity and efficiency. It is in line with the paradigm of model-driven architectures and top-down design.

The proposal uses multi-agent systems for modelling, development and prototyping. The versatility and expressive power of multi-agent systems allows obtaining solutions that satisfy the above requirements. The formal model of multi-agent system for electrical systems is particularized in the technological model, what it means an instance of the formal model for the selected framework for developing multi-agent systems. The development of the formal model using a particular framework is built in a Java library. This library can be used for instantiating agent classes and agents deploying on JADE framework.

In order to facilitate the design of multi-agent systems, it has been developed a prototype design aid environment independently from the technological model. It allows designing and configuring the multi-agent system setting the desired optimization criteria. It facilitates quick and easy prototyping, creating instances of each agent class and assigning values to the agent's parameters. Once it is configured, maximum generation forecasts and energy consumption can be simulated. The multi-agent system receives these forecasts simulations and optimizes the energy distribution according to specified criteria, which takes into account the objective function, being possible to evaluate the overall behaviour. If it is appropriated, the parameters value can be changed in order to get the desired results. The decoupling among the model, framework and prototyping environment allows the use of a single prototyping environment to create automated multi-agent systems for each multi-agent system framework integrated. It requires adapting the



formal model to each framework will be integrated. This work was carried out with JADE framework.

The main advantages of the proposed solution are:

- The ability to define recursive agents. An agent may contain a multi-agent system for setting different levels of abstraction.
- Applying the concept of region to the environment where the agents are located. Environment is segmented in regions so the agents located in a specific region are only aware of the changes on its region.
- Composition of agents such as the use of regions enhances the scalability and computing power of multi-agent system. Once the multi-agent model is defined, the classes of agents can be particularized giving value to their parameters according to the particular problem to solve.

The proposed technique to optimally distribute energy differs from existing solutions mainly in combining advantages of distributed and centralized computing and the possibility of load management. The aim of load management is to reduce energy consumption of the C agents, which are able of disabling non-critical functionalities. The optimization of electrical distribution is decomposed into two phases: the local and global. The first, which is fully distributed, establishes the exchange of messages leading to the set of interactions for choosing the best agents to provide power and the set of interactions that allows load management. The load management interactions ask for reducing power consumption disabling some functions. Instead, the global optimization phase, which is centralized, starts with the solution given in the previous phase and tries to improve it, looking for alternative paths considering the complete system to improve the goodness of the solution. Global optimization is performed in time bounded, so it looks for better solutions while there is available time.

Experimentation has made it possible to validate both the model and power distribution strategies into two diverse case studies. A metropolitan grid and a laptop equipped with a solar charger and battery. The choice of antagonistic scenarios has revealed the feasibility of the proposal.

The metropolitan grid provides power to medium sized city with a population around quarter of a million inhabitants. This city has five distribution substations connected in the first instance to the national transport network and also with several power plants. The whole national grid is not taken into account because



the study is focused on the city, establishing the level of abstraction into city. This fact allows us to consider the substations as generators of the city. Two auxiliary generators are considered for provide power exclusively to each hospital when there is not enough power from the grid. In addition to the five distribution centres and two auxiliary generators, three power plants, based on renewable energies, are considered in order to make more complex the case study: photovoltaic, solar thermal and wind-power are considered. The distribution obtained in the case of the metropolitan distribution network reflects its suitability to defined optimization criteria that favour the use of renewable energy sources.

The laptop is equipped with photovoltaic charger, battery, which is charged, and the grid connection, which is available just for two hours. The simulations has been made using three strategies: disabling load management, load management enabling to keep a minimum level of the battery's capacity and enabling load management to overcome the average consumption of each laptop's components. The first strategy, which does not use load management, provides all the power required by the laptop. This fact has an effect on the time that the laptop is turned on because it has to be turned off during three hours. Using second and third strategy the laptop is always turning on. The difference between the second and third strategy is the number of times that the load management is applied and the power saved thanks to load management. The second strategy applies load management less frequently, but it saves more power than the third.

From the viewpoint of applied technology, the research addresses the problem of managing power distribution systems and produces the following contributions:

- A methodology for modelling and development of multi-agent systems.
- A general model where solutions to problems can be obtained by particularization of a formal framework.
- A multi-agent system model applied to heterogeneous electrical grids.
- The development of the multi-agent system model applied to electrical grids on the JADE framework.
- Optimization strategies for power distribution that joins the advantage of distributed and centralized computing.



- Prototyping environment that makes use of the simulation as a means of validation and it is integrated with JADE framework.

In the plane essentially conceptual, this research involves a significant advance over the state of art in the following areas:

- Formal specification of heterogeneous electrical distribution networks, which is an improvement for the integral specification of the distribution network, for attempt the hierarchical tree from generation power plants to final customers.
- Proposal of a management model of open electricity distribution networks based on intelligent agents, covering almost all current technology needs, as well as medium-term foreseeable future.
- The use of simulation as part of experimentation in the field of electrical distribution, characterized by dynamism and versatility.

The research contained in this document opens a methodological and instrumental line for obtaining solutions to problem of power distribution at all levels, from electrical grids, to low power supply, which requires wearable devices, from the simple network with single power source to hybrid multi-frequency configurations and even multimedia (energy, data and control information). To date, the treatment of the problem has led to the level of pre-competitive development, which has resulted in the Spanish patent application "P201101361" entitled "System and method for the distribution and management of electrical energy."



2. Future work

There are several paths on the immediate horizon for this research. The proposal has to be validated in more realistic environment. Therefore, it is desirable to deploy the multi-agent system over a set of computing and communication devices. The computing devices have to be capable of monitoring consumed or generated power and also to communicate with consumer devices in order to manage the load conveniently. This development should provide us with a family of physical devices, where the prototyping design aid environment deploys the multi-agent system over them. Achieve the level of technology transfer that is the ultimate objective of this line of research.

The consideration of low-level electrical phenomena will allow considering subordinated electrical behaviour to help fine-tune of the system according to actual incidences of electrical distribution even external cause, as the effect of weather conditions or over-currents induced.

Incorporating optimization strategies based on the particular features of the power distribution network to manage, allows solving particularly depending on the conditions and even at the time.

Given that, the problem has been dealt at the level whose requirements and specifications are very open, especially making little or no consideration of the specifics of the electrical systems. This fact glimpses that its generalization or extension of this solution to other kind of transport problems (water, gas, etc.) should be reasonably simple.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Listado de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1. Evolución de la generación eléctrica mundial desde 1971 hasta 2010 en función de tipos de fuentes energéticas(IEA, 2012).....	28
Figura 1.2 Comparativa de porcentajes de utilización de fuentes de energía entre 1973 y 2010 Sostenibilidad energética (IEA, 2012).....	29
Figura 1.3 Producción eléctrica en EU27 en base a la fuente generadora en 2012 (EUROSTAT, 2012).....	35
Figura 1.4 Distribución de las reservas mundiales de petróleo en 2012 (BP, 2013)	36
Figura 1.5 Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los países pertenecientes a Europa-15 comparadas con los objetivos para 2008-2012 (DG CLIMA, 2013)	37
Figura 1.6 Evolución del consumo eléctrico desde 2003 hasta 2012 (EUROSTAT, 2012).....	38



Figura 1.7 Comparativa de las curvas de carga (MWh) de los días de máxima demanda horaria durante 2008-2012 (Red Eléctrica de España, 2013).....	41
Figura 1.8 Intercambio eléctrico entre países europeos y limítrofes (Red Eléctrica de España, 2013)	42
Figura 1.9 Taxonomía de soluciones tecnológico-sociales transparentes y activas que persiguen el consumo energético sostenible	46
Figura 1.10 Ámbito del problema abordado.....	47
Figura 1.11 Esquema del flujo de la electricidad en Estados Unidos (North American Electric Reliability Council, 2008).....	51
Figura 1.12 Esquema de gestión dinámica de consumo (Rajesh et al., 2003).....	71
Figura 1.13 Nomenclatura asociada a la representación de un sistema eléctrico mediante un grafo.....	76
Figura 1.14 Nivel general de la metodología para el modelado y prototipado de sistemas de gestión de la distribución eléctrica basada en arquitecturas dirigidas por modelos	79
Figura 1.15 Contenido de los modelos funcional, estructural y tecnológico, así como del resto de entidades que conforman la metodología.....	80
Figura 1.16 Diagrama de bloques con las tareas que definen el entorno de prototipado	81

Capítulo 2

Figura 2.1. Relaciones entre los modelos que define la metodología GAIA.....	110
Figura 2.2. Relaciones entre los modelos que componen la metodología BDI.....	112
Figura 2.3. Organización de los diagramas que modelan a los sistemas multiagente bajo la metodología AUML	114
Figura 2.4. Fases de la metodología FET de modelado y desarrollo.....	119
Figura 2.5 Tareas que componen la fase de análisis.....	119
Figura 2.6 Árbol resultado del proceso de obtener las clases de agentes definiendo relaciones de equivalencia.....	121



Figura 2.7 Árbol que muestra los roles que comparten cada uno de las clases de agentes al aplicar R'	123
Figura 2.8. Diagrama de flujo de datos entre las tareas de la fase de análisis.....	125
Figura 2.9 Tareas que componen la fase de diseño.....	127
Figura 2.10. Diagrama de flujo de datos de la fase de diseño.....	132
Figura 2.11. Tareas que componen la fase de implantación.....	133
Figura 2.12. Flujo de datos de las tareas que componen la fase de implantación.....	138
Figura 2.13. Resumen de las fases y tareas que componen el método FET.....	139
Figura 2.14. Flujo de datos entre las tareas que componen la metodología.....	139

Capítulo 3

Figura 3.1 Tipos de modelos de acuerdo a la propuesta de solución basada en la metodología FET.....	149
Figura 3.2 Taxonomía de las clases de agentes obtenidas al aplicar la relación de equivalencia R_f sobre el conjunto inicial de agentes $SMADE$	154
Figura 3.3 Taxonomía de las clases de agentes obtenidas al aplicar las relaciones de equivalencia R_f y R_s sobre $SMADE$ y S respectivamente.....	158
Figura 3.4. Vista de las relaciones de parentesco del agente α_i y los agentes que pertenecen a distintos niveles de abstracción.....	177
Figura 3.5. Diagrama entidad relación que muestra las relaciones de composición entre agentes y roles.....	177
Figura 3.6. Diagrama de secuencia que muestra el protocolo de interacción request definido en (FIPA, 2002c).....	211
Figura 3.7. Diagrama de secuencia que muestra el protocolo de interacción contract-net definido en (FIPA, 2002a).....	212

Capítulo 4

Figura 4.1. Importancia de los aspectos que intervienen en la distribución eléctrica para cada uno de los enfoques.....	224
---	-----



Figura 4.2. Vista general de la gestión de la distribución de energía eléctrica compuesta por dos fases.....	225
Figura 4.3. Diagrama de secuencia que ofrece una visión general del intercambio de mensajes entre las distintas clases de agentes en cada periodo	226
Figura 4.4. Conjuntos de agentes vecinos del agente <i>ca2</i> en función del atributo <i>k</i>	227
Figura 4.5. Organización del conjunto de interacciones que componen la fase de optimización local.....	228
Figura 4.6 Diagrama de secuencia, complementado con las acciones que determinan los mensajes a enviar, que describe la negociación para distribuir la energía disponible.....	229
Figura 4.7. Diagrama de secuencia, complementado con las acciones que determinan los mensajes a enviar, que describe la gestión de carga.....	233
Figura 4.8. Búsqueda de caminos alternativos en la fase de optimización global.....	240
Figura 4.9. Diagrama de secuencia que muestra el resumen de las interacciones entre las clases de agentes involucradas para obtener la distribución energética para un periodo de tiempo determinado.....	243

Capítulo 5

Figura 5.1 Panorámica de la Metodología FET que realiza el desarrollo de la solución a un problema particular instanciando el modelo tecnológico.....	249
Figura 5.2 Arquitectura de la plataforma de agentes JADE.....	254
Figura 5.3 Diagrama de paquetes UML que muestra las principales clases utilizadas del framework JADE	256
Figura 5.4 Diagrama de clases UML parcial que muestran las clases que componen los tipos de agentes <i>F, T</i> y <i>C</i>	260
Figura 5.5 Diagrama de clases UML parcial que muestra las principales clases que componen los tipos de agentes <i>OG, SP</i> y <i>PM</i>	261
Figura 5.6 Diagrama de paquetes UML que muestra las clases que contienen cada uno de los paquetes que componen el framework.....	264



Figura 5.7 Diagrama de bloques con las tareas que componen el entorno de prototipado	268
Figura 5.8 Aspecto del entorno de prototipado <i>pSMADÉ</i>	270
Figura 5.9 Instancia del entorno de prototipado que permite diseñar el sistema multiagente albergado en el agente transpondedor 4.....	273
Figura 5.10 Formulario de configuración de los nodos de computación en los que se puede distribuir el sistema multiagente resultante.....	274
Figura 5.11 Formulario de configuración de los parámetros relativos al agente de simulación de potencia	275
Figura 5.12 Formulario de configuración del agente de optimización global.....	276
Figura 5.13 Formulario de configuración de la ruta donde se encuentra <i>fdSMADÉ</i>	277
Figura 5.14 Arquitectura de capas que componen la propuesta de solución.....	278

Capítulo 6

Figura 6.1 Niveles de abstracción jerárquicos cuyos elementos representativos son ciudad, vivienda y ordenador portátil	295
Figura 6.2 Topología de las redes de transmisión de energía eléctrica tradicionales y smart grid.....	298
Figura 6.3 Curvas de generación máxima de los agentes FA1, FA2, FA3, FA4, FA5, FA6, FA7, FA8, FA9 y FA10	312
Figura 6.4 Curvas de carga de los agentes CA1, CA7, CA8 y CA9	313
Figura 6.5 Curvas de carga de los agentes CA2 y CA3.....	313
Figura 6.6 Curvas de carga de los agentes CA4, CA5 y CA6.....	314
Figura 6.7 Consumo requerido por CA1 que ha sido suministrado por FA1-5 y FA10	315
Figura 6.8 Consumo requerido por CA2 que ha sido suministrado por FA1-5, FA6 y FA9	316
Figura 6.9 Consumo requerido por CA3 que ha sido suministrado por FA1-5, FA7 y FA9.....	317
Figura 6.10 Consumo requerido por CA4 que ha sido suministrado por FA1-5.....	317



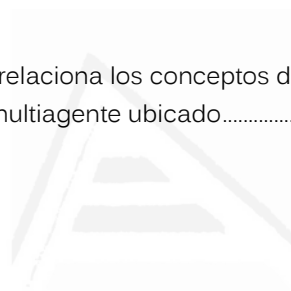
Figura 6.11 Consumo requerido por CA5 que ha sido suministrado por FA1-5	318
Figura 6.12 Consumo requerido por CA6 que ha sido suministrado por FA1-5	318
Figura 6.13 Consumo requerido por CA7 que ha sido suministrado por FA1-5, FA8 y FA10	319
Figura 6.14 Consumo requerido por CA8 que ha sido suministrado por FA1-5 y FA8	320
Figura 6.15 Consumo requerido por CA9 que ha sido suministrado por FA1-5, FA8 y FA10	321
Figura 6.16 Distribución del suministro energético aportado por FA1-5 hacia CA1, CA2, CA3, CA4, CA5, CA6, CA7, CA8 y CA9	322
Figura 6.17 Distribución del suministro energético aportado por FA6 hacia CA2	322
Figura 6.18 Distribución del suministro energético aportado por FA7 hacia CA3	323
Figura 6.19 Distribución del suministro energético aportado por FA8 hacia CA7, CA8 y CA9	323
Figura 6.20 Distribución del suministro energético aportado por FA9 hacia CA2 y CA3	324
Figura 6.21 Distribución del suministro energético aportado por FA10 hacia CA1, CA7 y CA9	325
Figura 6.22 Curvas de generación máxima de los agentes FA1, FA2 y TA1	337
Figura 6.23 Curvas de carga de los agentes CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 y CA6	338
Figura 6.24 Procedencia de la energía consumida por cada agente CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 y CA6	340
Figura 6.25 Evolución del estado de carga de la batería	341
Figura 6.26 Capacidad de suministro del agente FA1 y potencia suministrada a CAY	342
Figura 6.27 Capacidad de suministro del agente FA2 y potencia suministrada al agente TA1	342
Figura 6.28 Procedencia de la energía consumida por cada agente CAY	344
Figura 6.29 Evolución del estado de carga de la batería	345
Figura 6.30 Capacidad de suministro del agente FA1 y potencia suministrada a los agentes CAY	346



Figura 6.31 Capacidad de suministro del agente FA2 y potencia suministrada al agente TA1	346
Figura 6.32 Procedencia de la energía consumida por cada agente CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 y CA6	347
Figura 6.33 Evolución del estado de carga de la batería.....	349
Figura 6.34 Capacidad de suministro del agente FA1 y potencia suministrada a los agentes CAY.....	350
Figura 6.35 Capacidad de suministro del agente FA2 y potencia suministrada al agente TA1	350
Figura 6.36 Análisis de la energía requerida por los agentes CAY, la aportada en cada estrategia y la tendencia de cada estrategia.....	351
Figura 6.37 Análisis de la evolución del estado de carga de la batería en cada estrategia y su correspondiente tendencia.....	352
Figura 6.38 Análisis de la evolución de la producción de FA1 en cada estrategia.....	353

Anexo B

Figura B.1. Vista esquemática que relaciona los conceptos definidos en el modelo de sistema multiagente ubicado.....	397
--	-----



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Listado de Tablas

Capítulo 1

Tabla 1.1 Requerimientos para alcanzar el desarrollo sostenible energético.....	30
Tabla 1.2 Ámbitos generales del plan de acción definido en la cumbre de Gleneagles	32
Tabla 1.3 Retos identificados para alcanzar la sostenibilidad energética	33
Tabla 1.4 Familias de soluciones para abordar los retos asociados al desarrollo energético sostenible	45

Capítulo 2

Tabla 2.1. Análisis comparativo de los conceptos soportados por cada metodología	117
Tabla 2.2. Patrones de protocolos de interacción entre agentes definidos por FIPA.....	131

Capítulo 3

Tabla 3.1 Clases de agentes que componen el sistema multiagente <i>SMADE</i>	157
--	-----



Tabla 3.2. Resumen de las clases de agentes asociados a los roles identificados.....	161
Tabla 3.3. Resumen de los roles que implementa cada una de las clases de agentes	161
Tabla 3.4. Resumen de los objetivos asociados a cada uno de los roles	163
Tabla 3.5. Resumen de los objetivos de la clase de agente <i>F</i>	164
Tabla 3.6. Resumen de los objetivos de la clase de agente <i>T</i>	164
Tabla 3.7. Resumen de los objetivos de la clase de agente <i>C</i>	165
Tabla 3.8. Resumen de los objetivos de la clase de agentes <i>BA, IU, OG, SP, Og, PM</i>	165
Tabla 3.9. Resumen de las ventajas del modelo propuesto.....	172
Tabla 3.10. Interacciones iniciadas por la clase de agente <i>F</i>	213
Tabla 3.11. Interacciones iniciadas por la clase de agente <i>C</i>	214
Tabla 3.12. Interacciones iniciadas por la clase de agente <i>T</i>	215
Tabla 3.13. Interacciones iniciadas por las clases de agentes <i>BA, IU, OG, SP y PM</i>	216

Capítulo 5

Tabla 5.1 Relaciones entre los conceptos del modelo estructural y la plataforma de agentes JADE	257
Tabla 5.2 Equivalencias entre los agentes que gestionan potencia eléctrica en <i>pSMADe</i> , <i>fdSMADe</i> y el modelo estructural	271
Tabla 5.3 Acciones asociadas a cada uno de los iconos del entorno de prototipado.....	272

Capítulo 6

Tabla 6.1 Casos de estudio tipo en función del contexto sobre los que la propuesta de solución puede ser aplicada.....	293
Tabla 6.2 Tabla resumen de los elementos generadores de electricidad de la ciudad	301
Tabla 6.3 Demanda energética de cada centro de consumo de la ciudad tipo.....	302
Tabla 6.4 Relación binaria que representa abastecimiento energético entre generadores y consumidores.....	303
Tabla 6.5 Correspondencia entre componentes del caso de estudio y los modelos estructural, tecnológico <i>fdSMADe</i> y entorno de prototipado <i>pSMADe</i>	304



Tabla 6.6 Valor de los parámetros de los agentes FA1, FA2, FA3, FA4, FA5, FA6, FA7, FA8, FA9 y FA10	305
Tabla 6.7 Valor de los parámetros de los agentes CA1, CA2, CA3, CA4 y CA5	306
Tabla 6.8 Valor de los parámetros de los agentes CA6, CA7, CA8 y CA9	307
Tabla 6.9 Modos de funcionamiento que caracterizan al alumbrado público	308
Tabla 6.10 Modos de funcionamiento que caracterizan al Hospital A	308
Tabla 6.11 Modos de funcionamiento que caracterizan al Hospital B	308
Tabla 6.12 Modos de funcionamiento que caracterizan al Polígono Industrial A	308
Tabla 6.13 Modos de funcionamiento que caracterizan al Polígono Industrial B	309
Tabla 6.14 Modos de funcionamiento que caracterizan al Zona Residencial	309
Tabla 6.15 Modos de funcionamiento que caracterizan al Centro comercial	309
Tabla 6.16 Modos de funcionamiento que caracterizan al Complejo deportivo	309
Tabla 6.17 Modos de funcionamiento que caracterizan al Campus Universitario	310
Tabla 6.18 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de optimización global OGA1	310
Tabla 6.19 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de simulación de potencia SPA1	311
Tabla 6.20 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de predicción meteorológica PMA1	311
Tabla 6.21 Tabla resumen de los elementos generadores del portátil	327
Tabla 6.22 Capacidad de la batería del portátil	327
Tabla 6.23 Demanda energética de cada centro de consumo del portátil	328
Tabla 6.24 Relación binaria que representa el abastecimiento energético entre componentes generadores y consumidores	328
Tabla 6.25 Correspondencia entre componentes del caso de estudio y los modelos estructural, tecnológico <i>fdSMADÉ</i> y entorno de prototipado <i>pSMADÉ</i>	329



Tabla 6.26 Valor de los parámetros de los agentes FA1 y FA2	330
Tabla 6.27 Valor de los parámetros del TA1	331
Tabla 6.28 Valor de los parámetros de los agentes CA1, CA2, CA3, CA4, CA5 y CA6.....	333
Tabla 6.29 Modos de funcionamiento que caracterizan al procesador	334
Tabla 6.30 Modos de funcionamiento que caracterizan a la pantalla.....	334
Tabla 6.31 Modos de funcionamiento que caracterizan al disco duro	335
Tabla 6.32 Modos de funcionamiento que caracterizan al puerto USB A y B.....	335
Tabla 6.33 Modos de funcionamiento que caracterizan al resto de componentes del ordenador portátil.....	335
Tabla 6.34 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de optimización global OGA1.....	336
Tabla 6.35 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de simulación de potencia SPA1.....	336
Tabla 6.36 Valores de los parámetros que determinan el comportamiento del agente de predicción meteorológica PMA1.....	337

Anexo B

Tabla B.1. Definición de los conceptos utilizados en la definición de la ecuación B.9.....	391
Tabla B.2. Definiciones de las funciones que determinan el comportamiento de los agentes.....	392
Tabla B.3. Definiciones auxiliares que dan soporte a la definición B.11.....	394

Anexo A

Sistemas de Medición de Fasores

Introduce los fundamentos de los sistemas de medición de fasores. Se define el concepto de sincrofasor, destacando las ventajas y las aplicaciones prácticas de su uso en grandes redes de transmisión de electricidad.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



1. Introducción

Las pérdidas significativas de sincronización entre partes de la red eléctrica repercuten en que la red deje de ser estable y se produzca un corte de suministro. Así es como tienen lugar las interrupciones de suministro. Los ingenieros especialistas en redes han tratado siempre de supervisar –en tiempo real– los ángulos relativos de fase de todas las tensiones e intensidades de la red. En el pasado esto no era posible debido a la falta de capacidad de procesamiento y a las grandes dificultades propias de la recogida, coordinación y sincronización de los datos de la red. Las nuevas tecnologías han dado un vuelco radical a esta situación, ya que se han simplificado las matemáticas a aplicar. Para ello se han evitado las dificultades propias de las ecuaciones diferenciales con largas expresiones como $A \sin(\omega t + \phi)$, típicas de las ondas sinusoidales de la corriente alterna (CA) y variables en el tiempo. La simplificación ha supuesto pasar las ecuaciones referidas al eje temporal usual a otro sistema de coordenadas. Así, la figura A.1 muestra la corriente alterna, representada por la curva de la izquierda, que puede expresarse también con el diagrama de la derecha. El radio gira como un vector rotativo con frecuencia ω describiendo un círculo. La longitud del radio representa la amplitud, en este caso de la tensión. La componente vertical tiene el valor $A \sin(\omega t + \phi)$ en la curva sinusoidal de la CA. Este radio giratorio es el denominado fasor. El uso de la notación de fasores no solo trae consigo una importante simplificación matemática, sino que también reduce las necesidades de sistemas electrónicos y de capacidad de procesamiento. Esta simplificación hace posible la supervisión global de la red (Novosel et al., 2001).

La tecnología basada en unidades de medición fasorial (PMU) permite observar el estado dinámico de los sistemas eléctricos con gran precisión, debido a que es un equipo de medida, que además puede proporcionar funciones de protección y de control. Los avances tecnológicos y las investigaciones en este campo, permiten mediante las PMU, obtener fasores de tensiones y corrientes de forma sincronizada (Lozano et al., 2012). La técnica más común para la obtención de fasores es aplicar transformadas discretas de Fourier (DFT) sobre la señal eléctrica. Para ello, la señal debe pasar por un filtro antialiasing antes de que las muestras sean tomadas por el PMU. Este filtro introduce un retardo temporal que debe ser corregido por el PMU.

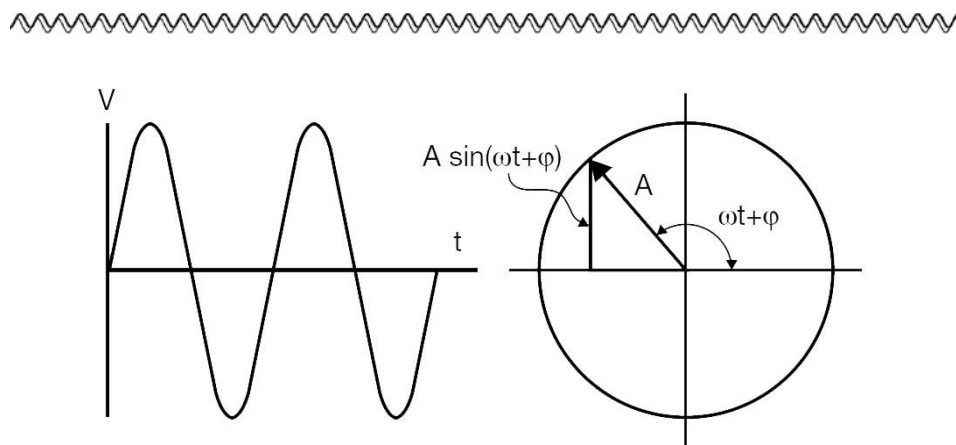


Figura A.1. Correspondencias ente onda sinusoidal y representación fasorial (Novosel et al., 2001)

Se define un sincrofasor como un fasor que ha sido estimado en un instante concreto, al fasor se le asigna dicho instante, a modo de etiqueta temporal (Time Tag). A la hora de realizar las mediciones en grandes sistemas eléctricos es necesario sincronizar las etiquetas temporales de cada fasor, de forma que para cada instante de tiempo se obtiene el fasor asociado a cada punto de medición (De La Ree et al., 2010). La sincronización se realiza utilizando un reloj que proporciona un pulso por segundo, dicha señal es proporcionada por un receptor GPS, que puede estar incorporado dentro de la PMU o instalado en la subestación para propagar dicho pulso a la PMU y al resto de dispositivos que requieran. Las etiquetas temporales se obtienen en intervalos que son múltiplos del periodo de la frecuencia nominal del sistema eléctrico (De La Ree et al., 2010).

Resulta conveniente definir unos requerimientos técnicos en función del ámbito de uso en el que se empleará dicho equipo y un plan de pruebas que determine si la PMU cumple dichos requerimientos (Cimadevilla, 2009). La norma IEEE C37.118 (IEEE, 2006), (IEEE, 2012) suele ser de gran ayuda a la hora de determinar tanto los requerimientos como el plan de pruebas, aunque existen ámbitos de aplicación cuyos requerimientos se encuentran fuera de la norma. El trabajo (Cimadevilla, 2009) enumera los principales aspectos a tener en cuenta: número de sincrofasores, precisión requerida, máximo tiempo de respuesta del proceso de filtrado, tasas de transferencia necesarias, contenido de la trama enviada, características de registro, integración de los PMUs con los relés de protección, etc.



2. Aplicaciones

Las PMU se utilizan en distintas aplicaciones que permiten supervisar y aumentar la eficiencia de las redes eléctricas. Su uso está extendido entre las compañías eléctricas y adquiere especial relevancia dentro de las redes inteligentes (Smart Grids). (Novosel et al., 2001) identifica las posibilidades que ofrecen: hacer estimaciones de gran precisión sobre el estado del sistema a intervalos a una gran frecuencia; mejorar notablemente los análisis posteriores a las perturbaciones, ya que la sincronización GPS permite obtener instantáneas precisas de los estados del sistema; posibilidad de implementar un sistema avanzado de protección a partir de las mediciones sincronizadas de fasores, con opciones para mejorar la respuesta global del sistema a los acontecimientos catastróficos.

La principal diferencia con los sistemas SCADA tradicionales radica en la frecuencia de lectura de las magnitudes a monitorizar. Haciendo uso de PMU se pueden realizar de 20 a 60 mediciones por segundo, mientras que utilizando sistemas SCADA para realizar 1 medición se requiere un tiempo del orden segundos (Avila-Rosales et al., 2009).

Los sistemas de medición fasorial se pueden aplicar a: sistemas de medición de redes de gran área (WAMS), sistemas de protección de redes de gran área (WAPS) y sistemas de control de redes de gran área (WACS). Estos sistemas pueden estar unidos dando lugar a sistemas de medición, protección y control de redes de gran área (WAMPACS).

Las aplicaciones de PMU se pueden clasificar en tiempo real o sin tiempo real (Yingchen et al., 2010). Las primeras PMU comerciales fueron aplicadas únicamente a la monitorización debido a la baja disponibilidad, al alto coste económico de las redes de telecomunicaciones para las aplicaciones de monitorización, control y protección en tiempo real. Su uso estaba destinado al análisis forense. Estos sistemas se conocen como sistemas digitales de grabaciones de perturbaciones (DSDR) (Burnett et al., 1994).

Un segundo uso de los sistemas WAMS está orientado a la estimación del estado de la red en tiempo real. Permite monitorizar el estado de las magnitudes



eléctricas a tener en cuenta. Estos sistemas se conocen como sistemas de monitorización de la frecuencia en redes (FNET) (Yingchen et al., 2010).

La aplicación a los sistemas de protección permite en primer lugar prevenir situaciones potencialmente peligrosas para la estabilidad del sistema y actuar de forma preventiva (ya que es posible monitorizar los datos hasta 60 veces por segundo). En el caso de que ocurra alguna incidencia, como la inestabilidad de la tensión, es posible evitar la propagación por el resto de la red. Los sistemas de protección de la estabilidad de la tensión estiman un margen de variación de la tensión en función de las cargas conectadas y cuando se sobrepasa dicho margen se actúa en consecuencia (Milosevic and Begovic, 2003).

La aplicación a los sistemas de control permite restaurar el sistema de una forma más rápida; aumentar la capacidad de transmisión mediante el control de temperatura; gestionar situaciones de congestión; controlar la estabilidad de tensión; prevenir la inestabilidad de la tensión; controlar el ángulo de las fases en distintos buses (Singh, 2012). Permite potenciar la estabilidad transitoria o estabilidad de carga, que hace referencia a la capacidad del sistema de mantener la sincronización cuando ocurre una incidencia grave (Lozano et al., 2012).



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Referencias

- (Avila-Rosales et al., 2009) Avila-Rosales, R., Rice, M. J., Giri, J., Beard, L. and Galvan, F. (2009) Recent experience with a hybrid SCADA/PMU on-line state estimator. *Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE.*
- (Burnett et al., 1994) Burnett, R. O., Butts, M. M., Cease, T. W., Centeno, V., Michel, G., Murphy, R. J. and Phadke, A. G. (1994) Synchronized phasor measurement of a power system event,. *IEEE Trans. Power Syst*, 9, 1643–1650.
- (Cimadevilla, 2009) Cimadevilla, R. (2009) Fundamentos de la Medición de Sincrofasores. *XIII Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré ERIAC.*
- (De La Ree et al., 2010) De La Ree, J., Centeno, V., Thorp, J. S. and Phadke, A. G. (2010) Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1, 20-27.
- (IEEE, 2006) IEEE (2006) Standard for Synchrophasors for Power Systems. IEEE Std C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995) .
- (IEEE, 2012) IEEE (2012) IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. IEEE Std C37.118-2011 (Revision of IEEE Std 1344-1995).
- (Lozano et al., 2012) Lozano, C. A., Castro, F. and Ramírez, S. (2012) Unidades de Medición de Fasorial (PMU). *El hombre y la Máquina* 38.



(Milosevic and Begovic, 2003) Milosevic, B. and Begovic, M. (2003) Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 18, 121-127.

(Novosel et al., 2001) Novosel, D., Kaba, M., Hart, D. H., Karlsson, D. and Gharpure, V. (2001) Unidades PMU Supervisión de las redes eléctricas: un nuevo enfoque. *Revista ABB*, 1, 58-61.

(Singh, 2012) Singh, A. K. (2012) Smart Grid Wide Area Monitoring, Protection and Control. *International Journal Of Computational Engineering Research*, 2.

(Yingchen et al., 2010) Yingchen, Z., Markham, P., Tao, X., Lang, C., Yanzhu, Y., Zhongyu, W., Zhiyong, Y., Lei, W., Bank, J., Burgett, J., Connors, R. W. and Yilu, L. (2010) Wide-Area Frequency Monitoring Network (FNET) Architecture and Applications. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1, 159-167.



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Anexo B

Modelo Weyns-Holvoet

Describe el modelo de sistema multiagente ubicado Weyns-Holvoet orientado a modelar las relaciones de interacción entre los agentes y el entorno en el que están ubicados, evitando la necesidad de sincronizar globalmente a todos los agentes. El modelo desgrana los conceptos de entorno, agente y sistema multiagente.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



1. Introducción

El modelo de entorno, agente y sistema multiagente propuesto por (Weyns and Holvoet, 2004) pertenece a la familia del modelo Ferber-Müller (Ferber and Müller, 1996). Pretende evitar los problemas de escalabilidad y de reducir las necesidades de sincronización global de los agentes mediante la sincronización regional. El modelo presta especial atención al concepto de entorno, situándolo como un primer nivel de abstracción (Weyns et al., 2007b), acentuando la ubicación de los agentes en el entorno y sus relaciones de interacción. Introduce una nueva definición de estado dinámico para representar el entorno y las funciones que permiten su evolución, extendiendo el modelo de influencias y reacciones a través de las “consumiciones”, que representan el resultado que las reacciones tienen sobre el entorno a partir de las influencias que reciben, de forma que los agentes pueden consumir dichas consumiciones. A su vez, se distingue entre agentes y actividades independientes que son propias del entorno y que suceden de forma externa a los agentes.

La sincronización regional evita que sea el entorno quien sincronice a todos los agentes dejando esta tarea a los propios agentes. Se evita la necesidad de un gran elemento de sincronización global dotando a cada agente con su propio sincronizador local. Cada sincronizador se encarga de sincronizarse con sus respectivos agentes asociados. El objetivo de la sincronización local es permitir que un subconjunto de agentes relacionados realice acciones simultáneas sobre el entorno. Los autores denominan “región” al subconjunto de agentes sincronizados, de forma que el sistema multiagente queda compuesto por regiones no solapadas. Los agentes al estar ubicados pueden no ser visibles al resto de los miembros de su región, por lo que se pueden sincronizar directamente con algunos de los miembros de la región e indirectamente con todos.

El anexo refleja parcialmente el trabajo desarrollado en (Weyns and Holvoet, 2004) y en (Weyns et al., 2007a), para obtener mayor detalle, consultar dichas referencias.



2. Sistema dinámico

El marco teórico establece un sistema dinámico, como un conjunto de actores, At , ubicados en un entorno, en el que se distinguen conjuntos de actores, α , que pueden realizar acciones simultáneas sobre el entorno. Se define A como el conjunto de todos los posibles subconjuntos de At . Estas definiciones se pueden ver en las ecuaciones definidas en B.1.

$$\begin{aligned}
 At &= \{a_1, \dots, a_n\} \\
 A &= 2^{At} \\
 \alpha &\subseteq At \\
 \alpha &\in A
 \end{aligned}
 \tag{B.1}$$

Además de las actividades o acciones que los actores pueden realizar sobre el entorno, es posible identificar un conjunto de actividades independientes "ongoing activities", Ac , que está formado por el conjunto de actividades independientes que tienen lugar de forma simultánea sobre el entorno, d_j . Tal y como se muestra en las ecuaciones B.2.

$$\begin{aligned}
 Ac &= \{d_1, \dots, d_m\} \\
 d_j &\in Ac \\
 D &= 2^{Ac}
 \end{aligned}
 \tag{B.2}$$

Se define la evolución del entorno a partir de la transformación del estado dinámico, δ , compuesto por el estado del entorno, σ y por el conjunto de consumiciones, ψ . Una consumición es el efecto que se produce en el entorno que produce un actor determinado. La consumición es el resultado de una reacción del entorno a las influencias realizadas por dicho actor. La dinámica del sistema queda definida a través de la función *Cycle*, que a partir del estado dinámico actual obtiene el siguiente estado dinámico, tal y como se muestran en las ecuaciones definidas en B.3.



$$\delta \in \Delta < \sigma, \psi >$$

$$\sigma \in \Sigma$$

$$\psi \in \Psi$$

B.3

$$\text{Cycle}: \Sigma \times \Psi \rightarrow \Sigma \times \Psi$$

$$\text{Cycle}(\sigma, \psi) = < \sigma', \psi' >$$

La función *Cycle* se puede separar en dos partes. La primera de ellas está compuesta, a su vez, por dos subfunciones, *Exec^A* y *Apply^D*. *Exec^A*, que se muestra en la ecuación B.4, representa las actividades realizadas por los actores sobre el entorno, mientras que las actividades independientes del entorno son representadas por *Apply^D*. La segunda parte está determinada por la función *React*, que refleja las reacciones del entorno a las actividades independientes y realizadas por los actores.

$$\text{Exec}^A: (2^{O^A}, ||) \times \Sigma \times \Psi \rightarrow \Gamma^A \times \Psi$$

B.4

$$\text{Exec}^\alpha((o_p || \dots || o_t), \sigma, \psi) = < \gamma^\alpha, \psi^I >$$

Se define $\alpha = \{a_p, \dots, a_t\}$ como el conjunto de actores simultáneos y $\gamma^\alpha \in \Gamma^A$ como el conjunto de influencias producidos por α con $\Gamma^A \subseteq \Gamma$, siendo Γ el conjunto de las influencias que se producen simultáneamente en el entorno. Las influencias se producen a partir de los operadores, que son producidos por los actores en paralelo y son compuestas por el operador $||$. El operador de composición utiliza como parámetros las operaciones, $o_i \in O^A$, de cada $a_i \in \alpha$. Siendo O^A el conjunto de operaciones de cada actor y O el conjunto de operaciones disponibles, tal que $O^A \subseteq O$. Cada operación o_i se define a través de la tupla $o_i: < \text{nombre}, \text{condición}, \text{influencias} >$ de forma que la operación *nombre* se aplica si se da la *condición* y las *influencias* muestran los efectos de la operación sobre el entorno. La ejecución simultánea de las operaciones de los actores, α , que consumen unas consumiciones, ψ , sobre el estado del entorno, σ , dan como resultado el conjunto de influencias que γ^α y el conjunto de consumiciones, ψ^I .

Por su parte, la ecuación B.5 muestra la función *Apply^D* que refleja el efecto del conjunto de actividades independientes, $d = \{d_r, \dots, d_v\}: d \in D$, aplicadas simultáneamente, de forma que $O^D \subseteq O$ representa el conjunto de operadores que



pueden ser aplicados por las actividades independientes, mientras que $\Gamma^D \subseteq \Gamma$ hace referencia al conjunto de influencias que pueden ser producidas por el entorno a través de la aplicación de los operadores de las actividades independientes.

$$\begin{aligned} \text{Apply}^D: (2^{O^D}, ||) \times \Sigma &\rightarrow \Gamma^D \\ \text{Apply}^d((o_r || \dots || o_v), \sigma) &= \gamma^d \end{aligned} \quad B.5$$

La combinación de las funciones Exec^A y Apply^D , se realiza a través del operador composición, \Downarrow , tal y como se muestra en la ecuación B.6.

$$\begin{aligned} \Downarrow: (2^{O^D}, ||) \times \Sigma \times ((2^{O^A}, ||) \times \Sigma \times \Psi) &\rightarrow \Gamma^D \times \Gamma^A \times \Psi \\ \Downarrow(((o_r || \dots || o_v), \sigma), ((o_p || \dots || o_t), \sigma, \psi)) &= \langle \gamma^d, \gamma^a, \psi^I \rangle \end{aligned} \quad B.6$$

La reacción del entorno a la aplicación simultánea de actividades de los actores y de las actividades independientes se define con la función React , ver ecuación B.7. Λ representa el conjunto de reglas que gobiernan el entorno, tal que $\lambda_q \in \Lambda$. A su vez, cada ley, λ_q , está determinada por la tripleta $\langle \text{conjuntoInfluencias}, \text{condiciones}, \text{efectos} \rangle$, el conjunto de influencias hace alusión a las influencias relacionadas con la ley, las condiciones son expresiones booleanas que reflejan el estado del entorno y los efectos representan el resultado de la ejecución satisfactoria de la ley en el sistema multiagente.

$$\begin{aligned} \text{React}: (2^A, ||) \times \Sigma \times \Gamma^D \times \Gamma^A \times \Psi &\rightarrow \Sigma \times \Psi \\ \text{React}((\lambda_q || \dots || \lambda_u), \sigma, \gamma^d, \gamma^a, \psi^I) &= \langle \sigma', \psi' \rangle \end{aligned} \quad B.7$$

Por último, la función Cycle equivale a la función React tal y como muestra la ecuación B.8.

$$\text{Cycle}(\sigma, \psi) = \text{React}((\lambda_q || \dots || \lambda_u), \sigma, \gamma^d, \gamma^a, \psi^I) = \langle \sigma', \psi' \rangle \quad B.8$$



3. Modelo de agente ubicado

Definición	Descripción
$Ag = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_n\}$	Agentes que componen el sistema multiagente
$y_i \in Y$	La identidad del agente a_i con $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$ el conjunto de identidades únicas, una por cada agente
$\mathcal{Y} = 2^Y$	Conjunto de los posibles subconjuntos de identidades de agentes
$p_i \in P_i$	Percepción del agente a_i , siendo P_i el conjunto de posibles percepciones de a_i
$c_i \in C_i$ $C_i \subseteq C$	Consumición consumida por a_i , con C_i el subconjunto de consumiciones que puede consumir dicho agente y siendo C el conjunto de las posibles consumiciones del MAS
$s_i \in S_i$	Estado interno del agente a_i , siendo S_i el conjunto de posibles estados de a_i
$v_i \in Y$	Conjunto de identidades relacionadas directamente con a_i
$\mu_i \subseteq M$	Conjunto de mensajes de sincronización de a_i , siendo M el conjunto de mensajes de sincronización del MAS
$o_i \in O_i^{Ag}$ $O_i^{Ag} \subseteq O^{Ag} \wedge O^{Ag} \subseteq O$	Operador del agente a_i , siendo O_i^{Ag} el subconjunto de operadores propios a a_i , O^{Ag} el subconjunto de operadores propios de los agentes y O el conjunto de operadores disponibles en el MAS

Tabla B.1. Definición de los conceptos utilizados en la definición de la ecuación B.9

El modelo de agente ubicado parte del marco teórico definido en el estado dinámico del entorno, redefiniendo el concepto de actor como un proceso genérico capaz de realizar operaciones sobre el entorno hacia el de agente



ubicado, a_i , dotado de memoria siendo posible abarcar a los agentes puramente reactivos, tal y como muestra la ecuación B.9.

$$a_i = \langle y_i, P_i, C_i, S_i, Y, M, O_i^{Ag}, Perception_i, Consumption_i, Memorization_i, B.9, Synchronization_i, Decision_i \rangle$$

La tabla b.1 muestra la definición de los conjuntos utilizados en la definición de agente, y la tabla b.2 muestra las funciones que determinan el comportamiento y las relaciones entre los elementos de dichos conjuntos.

Función	Descripción
$Id: Ag \rightarrow Y$	Función que devuelve la identidad del a_i
$Perception_i : \Sigma \rightarrow P_i$ $Perception_i(\sigma) =$ $Interpret_i(Sense_i(\sigma)) = p_i$	Función que obtiene la percepción que tiene a_i del entorno a partir de las composición de funciones <i>Interpret</i> y <i>Sense</i> .
$Consumption_i : \Psi \rightarrow C_i$ $Consumption_i(\psi) =$ $Consume_i(Identify_i(\psi)) = c_i$	Función que obtiene las consumiciones consumidas por a_i partir de las composición de funciones <i>Consume</i> e <i>Identify</i> .
$Memorization_i : P_i \times C_i \times S_i \rightarrow S_i$ $Memorization_i(p_i, c_i, s_i) = s'_i$	Función que permite a cada a_i registrar el conocimiento obteniendo un nuevo estado a partir de las últimas percepciones, consumiciones y estado interno
$Synchronization_i : P_i \rightarrow Y_i$ $Synchronization_i(p_i) = v_i$	Función que permite a un agente a_i sincronizarse con otros para realizar acciones simultáneas
$Decision_i : P_i \times C_i \times S_i \rightarrow O_i^{Ag}$ $Decision_i(p_i, c_i, s_i) = o_i$	Función que permite a cada a_i decidir cuál es la próxima acción a ejecutar

Tabla B.2. Definiciones de las funciones que determinan el comportamiento de los agentes



El comportamiento de un agente ubicado a_i puede ser descrito a partir de la función $Behaviour_i$ que es la composición de las funciones anteriores, tal y como muestra las ecuaciones definidas en B.10.

$$Behaviour_i : S_i \times \Sigma \times \Psi \rightarrow S_i \times O_i^{Ag} \times \Upsilon$$

$$Behaviour_i (s_i, \sigma, \psi) = \langle s'_i, o_i, v_i \rangle$$

$$s'_i = Memorization_i (p_i, c_i, s_i)$$

$$p_i = Perception_i(\sigma)$$

$$c_i = Consumption_i(\psi)$$

$$o_i = Decision_i (p_i, c_i, s_i)$$

$$v_i = Synchronization_i (p_i)$$

B.10



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



4. Modelo de sistema multiagente ubicado

Definición	Descripción
$f_k \in F$ $F \subseteq 2^{Ag}$	Una región sincronizada de agentes, f_k , siendo F el conjunto de todas las posibles regiones del MAS.
$g_i \in G_i^{Ag}$ $G_i^{Ag} \subseteq G^{Ag}$ $G^{Ag} \subseteq G$	Influencias provocada por el agente a_i , siendo G_i^{Ag} el conjunto de posibles influencias que pueden ser invocadas por a_i , G^{Ag} el conjunto de influencias que pueden invocadas por los agentes y siendo G el conjunto de las posibles influencias que pueden ser invocadas en el entorno.
$\gamma^f \in \Gamma^F$	Conjunto de influencias invocadas por una región f
$G_j^{Ac} \subseteq G^{Ac}$ $G^{Ac} \subseteq G$	Conjunto de influencias que pueden ser invocadas por las actividad espontánea, d_j , siendo G^{Ac} el conjunto de influencias que pueden ser invocadas por las actividades independientes
$\Gamma^{Ac} = 2^{G^{Ac}}$	El conjunto de conjuntos de influencias que pueden ser invocados por las actividades independientes
$\gamma_j \in \Gamma_j$ $\Gamma_j \subseteq 2^{G_j^{Ac}}$	Conjunto de influencias invocadas por la actividad espontánea d_j
$\gamma^d \in \Gamma^D$	Conjunto de influencias invocadas simultáneamente por el conjunto de actividades independientes d

Tabla B.3. Definiciones auxiliares que dan soporte a la definición B.11

La integración del modelo de agente ubicado con la teoría de estado dinámico descrita en las secciones anteriores da lugar al modelo de sistema multiagente ubicado que puede realizar acciones de forma simultánea en un entorno dinámico de forma regional o local. La definición B.11 muestra la tupla



compuesta por algunos de los conjuntos y funciones definidos anteriormente, a los que se han añadido elementos auxiliares que dan soporte a la sincronización regional entre subconjuntos de agentes.

$$\langle Ag, Id, Ac, Op, \Sigma, \Psi, O, \Lambda, \Omega, Y, \Phi, G, D, Exec_i, Compose^\Phi, Apply_i, Collect^D, \Downarrow, React, Cycle \rangle \quad B.11$$

Una vez definidos en la tabla b.3 los conceptos auxiliares que permiten especificar las funciones que dan soporte a la definición B.11, se procede a mostrar dichas definiciones en las siguientes ecuaciones.

La función $Exec^A$, definida previamente en el modelo de sistema multiagente, se divide en dos partes: $Exec_i$ que refleja las actividades realizadas por un agente individual, se redefine para cada agente a_i ; y la función $Compose^\Phi$. La primera de ellas se muestra las ecuaciones definidas en B.12.

$$Exec_i: O_i^{Ag} \times Y \times \Sigma \rightarrow G_i^{Ag} \times Y$$

$$Exec_i(o_i, v_i, \sigma) = \langle g_i, v_i \rangle \quad B.12$$

$$o_i = Decision_i(p_i, c_i, s_i)$$

$$v_i = Synchronization_i(p_i)$$

La composición de las actividades simultáneas de los agentes es modelada por la función $Compose^\Phi$, donde $\phi_k \in \Phi$ hace referencia al conjunto de regiones que actúan simultáneamente en el entorno. El agente a_i que pertenece a una región f_k se representa con $a_i \triangleright \phi_k$, tal y como muestra las ecuaciones definidas en B.13.

$$Compose^\Phi: 2^{G^{Ag}} \times 2^Y \times 2^C \times \Psi \rightarrow 2^{I^E} \times \Psi$$

$$Compose^\Phi((g_s, \dots, g_w), (v_s, \dots, v_w), (c_s, \dots, c_w), \psi) = \langle \{Y_{fk}\}^{\phi_k}, \psi^I \rangle \quad B.13$$

Análogamente a la separación realizada en los agentes, las realización simultánea de las actividades independientes se han separado en la función $Apply_j$, que expresa las actividades invocadas por una actividad espontánea, ver ecuaciones B.14; y la función $Collect^\Phi$.



$$Apply_j: O_j^{Ac} \times \Sigma \rightarrow \Gamma_j$$

$$Apply_j(o_i, \sigma) = \langle \gamma_j \rangle \quad B.14$$

$$o_j = Operation_i(d_j)$$

La función *Operation* devuelve el operador correspondiente a una actividad espontánea en el entorno, $Operation_i: Ac \rightarrow O^{Ac}$.

La función $Collect^D$, compone los conjuntos de influencias, γ^d a partir del conjunto de actividades independientes d , mediante la unión de los conjuntos de cada una de las actividades independientes $d_j \in d$. Ver definiciones en B.15.

$$Collect^D: 2^{\Gamma^{Ac}} \rightarrow \Gamma^D$$

$$Collect^d(\gamma_r, \dots, \gamma_v) = \gamma^d \quad B.15$$

$$\gamma^d = \cup^d_{\gamma_j} \quad \forall d_j \in d$$

Se redefine ligeramente la función \Downarrow para que combine los conjuntos de influencias obtenidas de las funciones $Compose^\Phi$ y $Collect^\Phi$. Ver ecuaciones definidas en B.16.

$$(\Downarrow): \left((2^{\Gamma^{Ac}}) \times (2^{\Gamma^{Ag}} \times 2^Y \times 2^C \times \Psi) \right) \rightarrow \Gamma^D \times 2^{\Gamma^F} \times \Psi$$

$$\Downarrow \left((\gamma_r, \dots, \gamma_v), ((g_s, \dots, g_w), (v_s, \dots, v_w), (c_s, \dots, c_w), \psi) \right) = \langle \gamma^d, \{\gamma_{fk}\}^{\phi^k}, \psi^l \rangle \quad B.16$$

Seguidamente, queda redefinir la función *React* que expresa la reacción del entorno a las actividades realizadas simultáneamente por los agentes, que componen a cada una de las regiones, teniendo en cuenta que no hay conflictos entre distintas regiones, y por las actividades independientes que suceden en el entorno. Ver ecuación B.17.

$$React: (2^A, ||) \times \Sigma \times \Gamma^D \times 2^{\Gamma^F} \times \Psi \rightarrow \Sigma \times \Psi$$

$$React((\lambda_q || \dots || \lambda_u), \sigma, \gamma^d, \{\gamma_{fk}\}^{\phi^k}, \psi^l) = \langle \sigma', \psi' \rangle \quad B.17$$



Por último, queda redefinir la función *Cycle* que muestra la evolución del sistema multiagente basándose en las interacciones dinámicas entre agentes y el entorno. Ver definición B.18.

$$Cycle: S \times \Sigma \times \Psi \rightarrow S \times \Sigma \times \Psi$$

$$Cycle((s_1 \times \dots \times s_n), \sigma, \psi) = \langle (s_1' \times \dots \times s_n'), \text{React}((\lambda_q || \dots || \lambda_u), \sigma, \gamma^d, \{\gamma_{fk}\}^{\phi^k}, \psi^l) \rangle \quad B.18$$

La Figura B.1 resume de forma orientativa la organización y las relaciones entre los principales conceptos que conforman el modelo de sistema multiagente ubiacado.

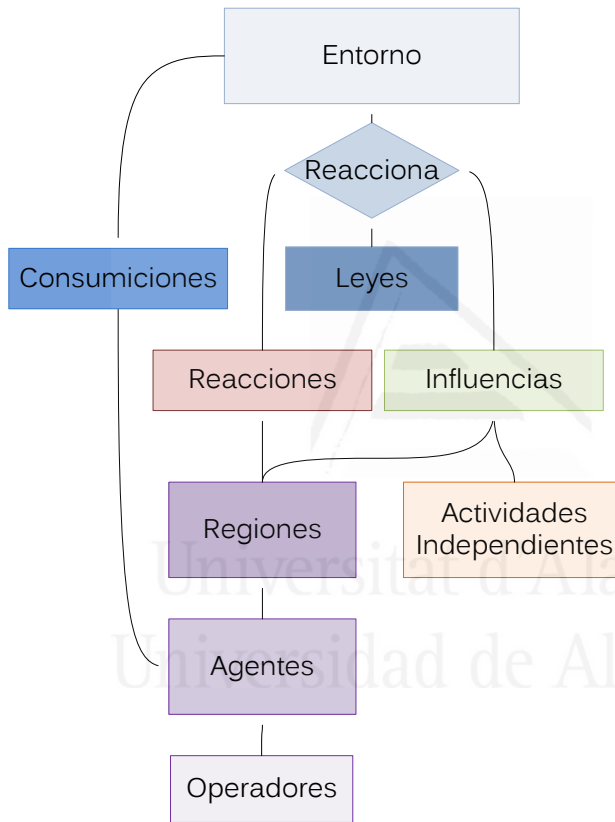


Figura B.1. Vista esquemática que relaciona los conceptos definidos en el modelo de sistema multiagente ubiacado



Referencias

- (Ferber and Müller, 1996) Ferber, J. and Müller, J. P. (1996) Influences and Reaction: a Model of Situated Multiagent Systems. *Proceedings of the 2th Conference on Multi-agent Systems*. Japan, AAAI Press.
- (Weyns and Holvoet, 2004) Weyns, D. and Holvoet, T. (2004) A Formal Model for Situated Multi-Agent Systems. *Fundam. Inf.*, 63, 125-158.
- (Weyns et al., 2007a) Weyns, D., Holvoet, T., Parunak, H. and Michel, F. (2007a) A Reference Architecture for Situated Multiagent Systems. *Environments for Multi-Agent Systems III*. Springer Berlin / Heidelberg.
- (Weyns et al., 2007b) Weyns, D., Omicini, A. and Odell, J. (2007b) Environment as a first class abstraction in multiagent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 14, 5-30.

Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

