



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTRÓNICA E  
TELECOMUNICAÇÕES E DE COMPUTADORES (DEETC)

ENGENHARIA INFORMÁTICA E DE COMPUTADORES

# SIMULADOR MULTI-AGENTE PARA O MERCADO ELÉCTRICO

Paulo Alexandre Soares Marques

DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM ENGENHARIA INFORMÁTICA E DE COMPUTADORES

Orientador:

Professor Doutor Paulo Trigo

Co-Orientador:

Professor Doutor Jorge Sousa

Novembro de 2008



*"Quem abandona a luta não poderá nunca saborear o gosto de uma vitória."*

Textos Judaicos



## *Resumo*

Esta dissertação, apresenta um simulador multi-agente para o mercado eléctrico. Neste simulador agentes heterogéneos, racionalmente limitados e com capacidade de aprendizagem, co-evoluem dinamicamente. O modelo de mercado apresentado é inspirado no mercado diário do MIBEL. É um modelo *Pool*, gerido por uma entidade operadora de mercado, onde compradores e vendedores podem licitar energia. No lado vendedor, empresas produtoras licitam a energia das suas unidades produtoras em pares quantidade-preço. Por outro lado, uma vez que o cenário simulado é um mercado de venda, o comprador apresenta uma procura fixa, i.e., submete apenas quantidades de energia. Todas as entidades do mercado eléctrico são vistas no sistema multi-agente, modelado através da plataforma INGENIAS, como agentes autónomos. Pelos resultados obtidos nas experiências feitas, confere-se que o simulador é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, pois ajuda a compreender o comportamento emergente do mercado e avalia o impacto das acções escolhidas, manualmente, pelo utilizador ou, automaticamente, através da aprendizagem por reforço. A aprendizagem por reforço visa facilitar a tomada de decisão humana na venda de energia, licitando a energia das unidades produtoras de forma a maximizar os lucros.



## *Abstract*

This dissertation presents a multi-agent simulator for the electric market. In this simulator, heterogeneous, rationally bounded and learning agents, co-evolve dynamically. The market model presented is inspired on the day ahead market of MIBEL. It is a Pool model, managed by an market operator entity, where buyers and sellers can bid energy. On the seller side, generating companies bid the energy of their generating units in quantity-price pairs. On the other hand, since the simulated scenario is a sale market, the buyer presents a fixed demand, i.e., submit only quantities of energy. All the entities of the electric market are seen in the multi-agent system, modeled through the INGENIAS platform, as autonomous agents. Through results obtained in experiments, it is shown that this simulator is a tool to support decision-making, hence it helps to understand the behavior of emerging market and evaluates the impact of the actions chosen, manually, by the user or, automatically, through reinforcement learning. Reinforcement learning facilitates the human decision-making in the energy selling process, bidding the energy of the generating units in order to maximize profits.



## *Agradecimentos*

Ao Professor Doutor Paulo Trigo, orientador desta tese, pelo estímulo, apoio e orientação que me ajudaram a encontrar os caminhos adequados para a concretização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Jorge Sousa, co-orientador desta tese, pelas indicações e contribuições prestadas.

A todos os que tiveram paciência para me ouvir, esclarecer e ajudar: João Lagarto, Jorge Borges, Rodrigo Braamcamp, Ricardo Covas, José Cascalho, Iván García-Magariño e Miguel Fonseca.

À minha família, em especial aos meus pais, Paula Marques e Heliodoro Marques, que tanto fizeram e abdicaram por mim, à minha avó, Arlete Domingos, pelo seu amor incondicional, ao meu irmão Heliodoro Marques e à minha cunhada Mónica Lemos, pelo seu apoio e companheirismo, e ao novo membro da família, o Santiago, pela esperança no futuro.

À Vera Lúcia, pela compreensão nos muitos momentos de ausência e por toda a paciência, carinho e amor nos momentos em que as dificuldades pareciam superiores.

Aos meus colegas de mestrado, Tiago Garcia, João Ferreira e Bruno Pereira, pelo espírito de grupo, pelas palavras de incentivo e pelos momentos de puro lazer e descontração.

Aos meus amigos, Rui Coelho, David Grade, Vanessa Fresca, Tiago Cavaleiro, Vânia Lourenço, Raúl Simplicio e António Godinho, pela amizade e apoio.

Por fim, a Deus, por estar a meu lado nesta longa caminhada, que é a vida.



# Conteúdo

<b>Resumo</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>Abreviaturas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objectivos . . . . .	2
1.2 Estrutura do Documento . . . . .	3
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1 Sistemas Multi-Agente . . . . .	5
2.1.1 Agentes . . . . .	6
2.1.2 Plataformas . . . . .	7
2.2 Aprendizagem por reforço . . . . .	11
2.2.1 Métodos para solução do problema . . . . .	12
2.2.2 Modelação de um problema . . . . .	13
2.3 Simuladores do Mercado Eléctrico . . . . .	14
2.3.1 PowerWeb . . . . .	16
2.3.2 AMES . . . . .	18
2.3.3 MASCEM . . . . .	18
2.3.4 EMCAS . . . . .	19
<b>3 Mercado Eléctrico</b>	<b>21</b>
3.1 Modelos de Mercado . . . . .	22
3.1.1 Modelo Pool . . . . .	22
3.1.2 Modelo de Contratos Bilaterais Físicos . . . . .	23
3.2 Estrutura do Mercado Ibérico de Electricidade . . . . .	24
3.2.1 Produção . . . . .	24
3.2.1.1 Tecnologias de Geração . . . . .	25
3.2.2 Transporte . . . . .	27

---

3.2.3	Distribuição . . . . .	28
3.2.4	Comercialização . . . . .	28
3.2.5	Gestão . . . . .	28
3.2.6	Consumo . . . . .	29
3.2.7	Outras entidades . . . . .	30
3.3	Modelo do Mercado Ibérico de Electricidade . . . . .	30
3.3.1	Mercado Diário . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Simulador Proposto</b> . . . . .	<b>35</b>
4.1	Mercado Eléctrico . . . . .	35
4.1.1	Unidades de produção . . . . .	36
4.1.2	Empresas produtoras . . . . .	39
4.1.3	Comprador . . . . .	42
4.1.4	Operador de mercado . . . . .	43
4.2	Mercado Eléctrico Multi-Agente . . . . .	45
4.2.1	Modelação das entidades do mercado . . . . .	47
4.2.1.1	Unidades de produção . . . . .	51
4.2.1.2	Empresas produtoras . . . . .	53
4.2.1.3	Comprador . . . . .	55
4.2.1.4	Operador de mercado . . . . .	57
4.2.2	Interacções . . . . .	60
4.2.3	Configuração de cenários . . . . .	67
4.3	Apoio à tomada de decisão . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Estudo de Caso</b> . . . . .	<b>71</b>
5.1	Caracterização das unidades de produção . . . . .	71
5.2	Experiência #1 . . . . .	72
5.3	Experiência #2 . . . . .	73
5.4	Experiência #3 . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b> . . . . .	<b>79</b>
6.1	Trabalho futuro . . . . .	80
<b>A</b>	<b>Ofertas Complexas</b> . . . . .	<b>83</b>
	<b>Bibliografia</b> . . . . .	<b>85</b>

# Lista de Figuras

2.1	Notações mais relevantes do INGENIAS. . . . .	10
3.1	Modelo Pool. . . . .	23
3.2	Estrutura do MIBEL. . . . .	24
3.3	Tecnologias Convencionais de Geração. . . . .	25
3.4	Central GT e Central CCGT. . . . .	26
3.5	Curvas agregadas do oferta e procura no Mercado Diário do MIBEL. . . . .	33
4.1	Estrutura e fluxos de informação do mercado eléctrico. . . . .	36
4.2	Interface gráfica da Unidade produtora. . . . .	39
4.3	Interface gráfica da Empresa produtora. . . . .	42
4.4	Interface gráfica do Comprador. . . . .	43
4.5	Interface gráfica do Operador de mercado. . . . .	44
4.6	Mercado Eléctrico Multi-Agente. . . . .	45
4.7	Comandos para iniciar uma instância R no "R Project". . . . .	46
4.8	Código parcial da classe Java de gestão de instâncias R. . . . .	46
4.9	Modelo de agente típico. . . . .	47
4.10	Diagrama de componentes da aplicação interna Agente_UserApp. . . . .	48
4.11	Modelo de tarefas e objectivos típico. . . . .	49
4.12	Componentes criadas pelas tarefas. . . . .	50
4.13	Diagrama de componentes das tarefas InitAgente_T e UpdateAgente_T. . . . .	50
4.14	Modelo de agente do agente Agente_B e Agente_C. . . . .	51
4.15	Modelo de agente da unidade de produção GenUnit_A. . . . .	52
4.16	Modelo de tarefas e objectivos da GenUnit. . . . .	52
4.17	Modelo de agente da empresa de produção GenCo_A. . . . .	53
4.18	Modelo de tarefas e objectivos da GenCo. . . . .	54
4.19	Modelo de agente do comprador DemCo_A. . . . .	56
4.20	Modelo de tarefas e objectivos da DemCo. . . . .	56
4.21	Modelo de agente do operador de mercado Pool_A. . . . .	58
4.22	Modelo de tarefas e objectivos da Pool. . . . .	59
4.23	Definição típica de uma interacção. . . . .	61
4.24	Definição das interacções do SMA. . . . .	62
4.25	Interacções do SMA. . . . .	62
4.26	Definição típica do protocolo. . . . .	63
4.27	Interacções do SMA. . . . .	64
4.28	Protocolos de interacção do SMA. . . . .	64
4.29	Modelo de tarefas e objectivos das tarefas envolvidas no protocolo de interacção da <i>GenCo</i> com as suas <i>GenUnits<sub>GenCo</sub></i> . . . . .	65

---

4.30	Modelo de tarefas e objectivos das tarefas envolvidas no protocolo de interacção da <i>Pool</i> com as <i>GenCos</i> . . . . .	66
4.31	Modelo de tarefas e objectivos das tarefas envolvidas no protocolo de interacção da <i>Pool</i> com a <i>DemCo</i> . . . . .	66
4.32	Modelo de tarefas e objectivos das tarefas envolvidas no protocolo de interacção da <i>Pool</i> com as <i>GenCos</i> ( envio dos resultados de mercado). . . . .	67
4.33	Diagrama de implantação da experiência #2. . . . .	68
5.1	Processo de aprendizagem da política óptima que maximiza o lucro. . . . .	73
5.2	Ofertas de licitação da <i>GenCo_activa</i> na hora 1 da iteração 79 . . . . .	73
5.3	Evolução da quota de mercado conduzida pela <i>GenCo_pequena&amp;activa</i> . . . . .	75
5.4	Lucro da <i>GenCo_pequena&amp;activa</i> . . . . .	75
5.5	Ofertas de licitação da <i>GenCo_pequena&amp;activa</i> na hora 1 da iteração 110. . . . .	75
5.6	Evolução da quota de mercado. . . . .	76
5.7	Preço de fecho de mercado. . . . .	77

# Lista de Tabelas

2.1	Características dos principais simuladores do mercado eléctrico. . . . .	17
4.1	Exemplo de utilização da fórmula WithHeatRate. . . . .	38
4.2	Tarefas e objectivos do agente Agente_A. . . . .	48
4.3	Descrição da tarefa InitAgente_T. . . . .	49
4.4	Descrição da tarefa UpdateAgente_T. . . . .	50
4.5	Tarefas e objectivos do agente GenUnit_A. . . . .	52
4.6	Descrição da tarefa InitGU_T. . . . .	53
4.7	Descrição da tarefa UpdateGU_T. . . . .	53
4.8	Tarefas e objectivos do agente GenCo_A. . . . .	54
4.9	Descrição da tarefa InitGC_T. . . . .	55
4.10	Descrição da tarefa UpdateGCData_T. . . . .	55
4.11	Descrição da tarefa ObtainGUData_T. . . . .	55
4.12	Tarefas e objectivos do agente DemCo_A. . . . .	56
4.13	Descrição da tarefa InitDC_T. . . . .	57
4.14	Descrição da tarefa UpdateDCData_T. . . . .	57
4.15	Tarefas e objectivos do agente Pool_A. . . . .	58
4.16	Descrição da tarefa InitPool_T. . . . .	59
4.17	Descrição da tarefa UpdatePool_T. . . . .	59
4.18	Descrição da tarefa ObtainGCBids_T. . . . .	60
4.19	Descrição da tarefa ObtainDCBids_T. . . . .	60
4.20	Descrição da tarefa SendResults_T. . . . .	60
5.1	Propriedades das unidades de produção. . . . .	72
5.2	Patamares de "heat rate" e custos marginais das unidades de produção. . .	72
5.3	Cenário da experiência #1. . . . .	72
5.4	Cenário da experiência #2. . . . .	74
5.5	Cenário da experiência #3. . . . .	76



# Abreviaturas

<b>CBF</b>	Contrato Bilateral Físico
<b>CCGT</b>	Unidade térmica de Ciclo Combinado com Turbina a Gás
<b>CNE</b>	”Comisión Nacional de Energia”
<b>CO</b>	Unidade térmica baseada em Carvão
<b>EDP</b>	Energias de Portugal
<b>ERSE</b>	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
<b>GT</b>	Unidade térmica com Turbina a Gás
<b>MIBEL</b>	Mercado Ibérico de Electricidade
<b>MW</b>	Mega Watt
<b>OMI</b>	Operador do Mercado Ibérico
<b>OMEL</b>	”Operador del Mercado Ibérico de Energia”
<b>OMIP</b>	Operador do Mercado Ibérico de Energia
<b>REE</b>	”Red Eléctrica de España”
<b>REN</b>	Rede Eléctrica Nacional
<b>SMA</b>	Sistema Multi-Agente



# Capítulo 1

## Introdução

A organização típica do sector eléctrico, até à década de 80, era baseada em empresas verticalmente integradas responsáveis por todas as funções do mercado (i.e. produção, transporte, distribuição e gestão do mercado). Esse modelo de monopólio ao longo dos anos tem sido alterado através da liberalização do sector. O processo de liberalização verifica-se em diversos países, e.g. Noruega, Suécia, Alemanha, Inglaterra, Estados Unidos, e também em Portugal, cuja liberalização do mercado ficou completa em 4/09/2006. As mudanças introduzidas visam tornar o mercado eléctrico mais competitivo, esperando-se reflexos ao nível dos preços e da melhoria da qualidade de serviço.

Um aspecto com fortes implicações na liberalização consiste na integração de mercados. Este é um aspecto distinto da liberalização pois é possível promover a liberalização de um mercado sem o integrar com outro, assim como é possível integrar dois mercados que não estejam liberalizados. No entanto, a integração de mercados apresenta-se como um factor catalisador do processo de liberalização, uma vez que mitiga problemas de poder de mercado e aumenta a eficiência económica global.

A nível europeu, está em curso a criação do Mercado Interno da Electricidade, que será construído a partir da integração progressiva de mercados regionais de âmbito supranacional como sejam a NordPool, formada pela Noruega, Suécia, Finlândia e Dinamarca, e o MIBEL (em funcionamento desde 01/07/2007) que integra os mercados eléctricos de Portugal e Espanha.

Estes dois aspectos, i.e., a liberalização e a integração dos mercados eléctricos, trazem dificuldades e oportunidades aos agentes do mercado, nomeadamente aos agentes vendedores de energia (onde há mais competição), uma vez que o aumento da complexidade e da competitividade no novo modelo de mercado eleva também a necessidade de compreender as interacções entre os vários participantes e a sua influência no comportamento emergente do mercado. Mais, esta nova organização eleva também a tomada de decisão humana no ajustar das estratégias comerciais dos activos da energia, i.e., devido à falta de informação sobre o comportamento do mercado e sobre a reacção dos seus participantes, o agente humano não tem informação suficiente para avaliar o impacto das suas acções no mercado, podendo estas ter um efeito contrário ao pretendido e trazer grandes perdas ao agente.

É importante portanto, fornecer aos agentes do mercado eléctrico ferramentas que os auxiliam a lidar com as dificuldades implícitas neste novo modelo de mercado, i.e., a complexidade e a competitividade.

## 1.1 Objectivos

Esta dissertação tem como objectivo mitigar as dificuldades encontradas pelos agentes do mercado eléctrico na nova configuração do mercado, fornecendo-se para isso uma ferramenta de apoio. Pretende-se com ela, i) ajudar os agentes analisar o comportamento do mercado eléctrico (numa macro-escala) e ii) ajudar os agentes vendedores de energia na sua tomada de decisão.

Para alcançar o primeiro objectivo, propõe-se um simulador multi-agente que representa artificialmente o mercado eléctrico (cf. secção 4.2). No simulador, os agentes do mercado podem avaliar o impacto das suas decisões e compreender o comportamento emergente do mercado.

Para alcançar o segundo objectivo integra-se nos agentes vendedores de energia do simulador proposto a capacidade de aprendizagem. Pretende-se com esta introdução apoiar o agente vendedor, de modo a responder da melhor forma às estratégias de outros agentes.

O essencial do trabalho desenvolvido foi apresentado em [Trigo & Marques, 2008] e [Marques & Trigo, 2008].

Neste trabalho é proposto um simulador multi-agente para o mercado eléctrico. O simulador é baseado no mercado diário do MIBEL e representa as entidades do mercado eléctrico como agentes autónomos. No mercado eléctrico, modelado com o INGENIAS, estão presentes as entidades unidades produtoras, onde é gerada a energia, as empresas produtoras que licitam a energia das suas unidades produtoras em mercado, o comprador, representando todo o consumo, e a entidade operadora de mercado, que gere um modelo *Pool*, num contexto de mercado do dia seguinte e como um leilão de venda.

Adicionalmente, para apoiar a tomada de decisão dos agentes vendedores de energia integrou-se no simulador proposto a capacidade de aprendizagem, através da aprendizagem por reforço (cf. secção 4.3).

## 1.2 Estrutura do Documento

Este documento está estruturado em seis capítulos:

- *Capítulo 1*: i.e., o presente capítulo, expõe a motivação do autor para este trabalho, os objectivos que se pretende atingir com o mesmo e a estrutura do documento.
- *Capítulo 2*: Efectua o enquadramento aos sistemas multi-agente e à aprendizagem por reforço. No fim, destaca-se da literatura alguns simuladores para o mercado eléctrico.
- *Capítulo 3*: Apresenta o mercado eléctrico, descrevendo a estrutura do MIBEL e o seu modelo de mercado, bem como, dois modelos típicos de mercado que suportam o modelo de mercado do MIBEL.
- *Capítulo 4*: Apresenta o simulador multi-agente para o mercado eléctrico, através da descrição do mercado eléctrico modelado, da passagem desse mercado para um sistema multi-agente e da integração da aprendizagem por reforço no simulador.
- *Capítulo 5*: Experimenta o simulador proposto no capítulo 4 e avalia os resultados alcançados nas experiências efectuadas.
- *Capítulo 6*: Apresenta as conclusões resultantes do trabalho realizado. O capítulo conclui com a apresentação de propostas de refinamento ao simulador construído e temas em aberto para futura investigação.



## Capítulo 2

# Estado da Arte

O simulador multi-agente proposto para o mercado eléctrico integra três grandes áreas: i) sistemas multi-agente, ii) aprendizagem, e iii) mercado eléctrico. Na secção 2.1, apresenta-se a área dos sistemas multi-agente, a noção de agente e as suas características, e destacam-se da literatura as plataformas OAA, Repast, JADE e INGENIAS para construir sistemas multi-agente. Na secção 2.2, apresenta-se a área da aprendizagem por reforço, utilizada no simulador proposto para apoiar a tomada de decisão dos agentes vendedores de energia. Nela apresentam-se os mecanismos e métodos utilizados nesta área de aprendizagem, nomeadamente, o método Q-learning. A secção 3, apresenta o tema dos mercados eléctricos, onde se aborda a questão da liberalização e se descreve o mercado de referência do simulador proposto, i.e., o Mercado Ibérico de Electricidade.

Na secção 2.3, destacam-se alguns dos sistemas existentes para simular o mercado eléctrico. Os simuladores destacados, PowerWeb, AMES, MASCEM e EMCAS, têm actualmente relevo no mercado eléctrico e abordam as mesmas áreas do simulador desenvolvido.

### 2.1 Sistemas Multi-Agente

Os sistemas multi-agente (SMA) são sistemas compostos por múltiplos agentes (tipicamente heterogéneos) que exibem um comportamento autónomo mas que ao mesmo tempo têm uma componente social, interagindo com outros agentes (e possivelmente com seres humanos) para resolver um determinado problema ou objectivo.

Os SMA são explorados para representar sistemas com elevado número de interacções, distribuídos, com necessidade de interoperabilidade entre as diferentes entidades envolvidas.

Das várias áreas de aplicação dos SMA (e.g. resolução de problemas, equipas de robôs, simulação social) a que possui mais interesse para o trabalho desta dissertação é a da simulação, uma vez que se pretende construir um modelo do mercado eléctrico, com as suas entidades, os seus comportamentos e as suas interacções, de modo a compreender o seu comportamento emergente.

### 2.1.1 Agentes

O termo agente é utilizado em diversas áreas com diferentes significados, não há por isso um conceito único de agente. Uma definição abrangente, de acordo com [Russell *et al.*, 1995], diz que um agente é algo que percebe o seu ambiente através de sensores e actua nele através de mecanismos de acção (efectuadores).

Segundo [Wooldridge & Jennings, 1995], os agentes são categorizados tradicionalmente nos seguintes tipos:

- reactivo;
- deliberativo, e;
- híbrido.

Um agente reactivo é um agente que reage simplesmente às mudanças que ocorrem no ambiente ou a mensagens provenientes de outros agentes, utilizando um modelo estímulo-resposta, como um autómato, baseando-se em comportamentos pré-definidos. Geralmente, estes agentes não mantêm estado interno (i.e., não têm memória das acções tomadas) e não planeiam acções futuras. O seu inconveniente é a falta de adaptabilidade, i.e., não podem actuar adequadamente se o estado actual do ambiente não for considerado *a priori*. Tipicamente, este tipo de agente é utilizado em situações simples e bem conhecidas, sem necessidade de raciocínio.

Um agente deliberativo é caracterizado por possuir um modelo simbólico e explícito do ambiente e, eventualmente, dos outros agentes. Estes agentes podem raciocinar sobre as

acções tomadas no passado e planear acções futuras, utilizando o modelo do ambiente para gerar um plano que seja bem sucedido na realização dos seus objectivos, mesmo em situações imprevistas. Esta capacidade de adaptação é desejável em ambientes dinâmicos. O principal problema deste tipo de agente é o tempo de reacção em sistemas de tempo real (e.g. futebol robótico), onde é importante minimizar os atrasos entre as mudanças do ambiente e a sua reacção.

Um agente híbrido combina os dois modelos de agente anteriormente referidos incorporando aspectos deliberativos e aspectos reactivos. O objectivo desta solução é normalmente juntar o melhor de cada modelo, evitando os seus pontos fracos. Neste caso, os agentes são dotados de comportamento reactivo em relação aos eventos que ocorrem no ambiente, de modo a ter um tempo de resposta pequeno, e comportamento deliberativo para gerar novos planos para situações imprevistas.

### 2.1.2 Plataformas

Existem várias plataformas desenvolvidas para facilitar a implementação de SMA, algumas delas são amplamente utilizadas, outras já não são suportadas. Esta secção descreve as plataformas utilizadas nos simuladores destacados na secção 2.3 (OAA e Repast) e no simulador proposto (INGENIAS a gerar código para JADE). A informação sobre as demais plataformas existentes pode ser obtida na página Web de Leigh Tesfatsion<sup>1</sup>, que mantém informação sobre um grande número de ferramentas, e em [van Dintner, 2007].

**OAA.** O "Open Agent Architecture"<sup>2</sup> (OAA) [Martin *et al.*, 1999] é uma plataforma de investigação para construir sistemas baseados em agentes, possibilitando a prestação de serviços através de esforços cooperativos de colecções distribuídas de agentes autónomos [Cheyer & Martin, 2001]. A plataforma consiste num agente facilitador e em bibliotecas, em várias línguas, que são utilizadas na construção de SMA.

Cada agente participante num sistema baseado no OAA define e publica um conjunto de declarações de capacidades, expressa em "Interagent Communication Language" (ICL), descrevendo os serviços que fornece.

<sup>1</sup> <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/acecode.htm>

<sup>2</sup> <http://www.ai.sri.com/õaa/>

A comunicação e cooperação entre os agentes é intermediada por um ou mais facilitadores que são responsáveis por comparar os pedidos, dos utilizadores e agentes, com as descrições das capacidades dos outros agentes de modo a construir um plano para satisfazer os objectivos da maneira mais apropriada e eficiente. O requisitante (utilizador ou agente) não precisa de conhecer a identificação ou localização do outro agente envolvido na satisfação do seu pedido.

Os facilitadores não são vistos como controladores centralizados, mas mais como coordenadores, uma vez que baseiam o seu conhecimento a partir de diferentes recursos, potencialmente distribuídos, para guiar as suas escolhas de delegação.

**Repast.** O "Recursive Porous Agent Simulation Toolkit" <sup>3</sup> (Repast) é uma plataforma para criar simulações baseadas em agente com ênfase nas interacções sociais. Com o Repast é possível construir simulações em várias plataformas (Python, Java, Microsoft .Net Framework) [North *et al.*, 2007] e inclui classes para visualização de objectos (espaços geográficos e agentes), recolha e visualização de estatísticas, escalonamento de eventos, observação de agentes, (re)configuração de parâmetros, gravação e obtenção de imagens de uma simulação, etc. Apesar do Repast suportar diversas características de simulação falta-lhe porém a capacidade de distribuir agentes em diferentes computadores. Uma vez que o Repast está em contínuo desenvolvimento, espera-se que uma próxima versão suporte a distribuição de agentes.

**JADE.** O "Java Agent DEvelopment framework" <sup>4</sup> (JADE) [Bellifemine *et al.*, 2007] é uma plataforma implementada na linguagem Java que simplifica o desenvolvimento de SMA, principalmente ao nível da gestão de agentes, comunicação e teste. O JADE garante interoperabilidade entre SMA através de um conjunto de agentes que fornecem serviços de comunicação inter-agente, de acordo com as especificações da "Foundation for Intelligent Physical Agents" <sup>5</sup> (FIPA). As especificações FIPA definem: i) serviço de nomes, que indica a localização de um determinado agente dado o seu nome, ii) serviço de páginas amarelas, onde um agente pode procurar outros agentes a partir do serviço que disponibilizam, e iii) todos os aspectos que não fazem parte do agente em si e que

---

<sup>3</sup> <http://repast.sourceforge.net/>

<sup>4</sup> <http://jade.tilab.com/>

<sup>5</sup> <http://www.fipa.org/>

são independentes das aplicações tais como, transporte, codificação e interpretação de mensagens e ciclo de vida dos agentes.

O JADE não foi desenvolvido para fazer simulações mas para construir SMA. Contudo, muitas simulações e aplicações baseadas em agentes são construídas directamente em JADE.

**INGENIAS.** O INGENIAS <sup>6</sup> é uma metodologia e um conjunto de ferramentas para desenvolver SMA [Pavón & Gómez-Sanz, 2003]. Como metodologia, integra os resultados de outras propostas e considera o SMA a partir de cinco perspectivas complementares: i) organização, ii) agente, iii) tarefas e objectivos, iv) interacções, e v) meio ambiente. O INGENIAS é apoiado por um conjunto de ferramentas para modelação (editor gráfico, que permite definir um SMA através de uma linguagem visual), documentação e geração de código (para diferentes plataformas de agentes, e.g. plataforma JADE).

O INGENIAS foi criado em 2002 [Gómez-Sanz, 2002] e é actualmente mantido pelo grupo de investigação *Grasia* <sup>7</sup>.

A plataforma tem ganho relevo na área da modelação de SMA, obtendo o prémio de melhor demonstração de sistema na conferência AAMAS 2008 [Gómez-Sanz *et al.*, 2008]. Segundo [Rodríguez-Elias *et al.*, 2005], o INGENIAS é uma das mais completas metodologias existentes para desenvolver SMA.

Esta dissertação, na sequência do contacto com os autores na conferência AAMAS 2008, adoptou o INGENIAS como ferramenta de suporte à modelação do mercado eléctrico, pelo que, será descrito de modo mais detalhado.

No INGENIAS, a abordagem para especificar um SMA consiste em dividir o problema em aspectos mais concretos formando diferentes vistas do sistema. Cada tipo de vista é descrita por um modelo, com base num meta-modelo. Um meta-modelo representa o tipo de entidades que podem existir num modelo, as suas relações e restrições de aplicação.

O INGENIAS reconhece cinco modelos que descrevem as vistas do sistema:

---

<sup>6</sup> <http://ingenias.sourceforge.net/>

<sup>7</sup> <http://grasia.fdi.ucm.es>

- **Modelo do Agente:** Descreve o agente, as suas tarefas, objectivos, estado mental inicial, papéis ("roles") desempenhadas e qualquer outra entidade do sistema que ajude na descrição do seu estado.
- **Modelo de Interação:** Descreve como as interacções entre os agentes se devem realizar. Cada interacção declarada inclui os agentes envolvidos, os objectivos que a interacção persegue, e uma descrição do protocolo que comanda a interacção.
- **Modelo de Tarefas e Objectivos:** Descreve a estrutura das tarefas, a estrutura dos objectivos e as relações entre objectivos e tarefas. É usado também para expressar quais são as entradas e saídas das tarefas e quais são os seus efeitos sobre o meio ambiente ou sobre o estado mental de um agente.
- **Modelo de Organização:** Descreve como as componentes do sistema (i.e agentes, papéis ("roles"), recursos e aplicações) são agrupadas, quais as tarefas que são executadas em comum, quais os objectivos que partilham, e quais as restrições existentes na interacção entre agentes.
- **Modelo do Meio Ambiente:** Define a percepção do agente em termos dos elementos existentes do sistema. Identifica também os recursos do sistema e quem é o responsável pela sua gestão.

Um SMA será composto por diversos modelos como os descritos anteriormente. Não existindo restrições no número de modelos de cada tipo. Para melhor compreensão do trabalho desenvolvido na secção 4.2, a figura 2.1 contém as notações mais relevantes do INGENIAS.

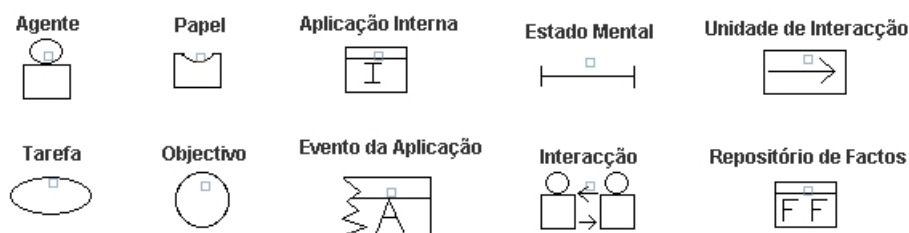


FIGURA 2.1: Notações mais relevantes do INGENIAS.

## 2.2 Aprendizagem por reforço

A aprendizagem por reforço (AR), segundo Sutton e Barto, permite que um agente aprenda a alcançar objectivos através da interacção com o ambiente [Sutton & Barto, 1998].

O agente aprendiz percebe o estado do ambiente e decide que acção executar nesse ambiente. Como resultado dessa acção, o estado do ambiente é alterado e o agente recebe um reforço (valor numérico de recompensa ou penalização) fornecido pelo ambiente (ou gerado internamente pelo agente) relativo ao efeito da acção executada. O agente executa um *processo de decisão sequencial*, tipicamente modelado como um processo de decisão de Markov, onde o reforço obtido depende da sequência de decisões tomadas e onde existe incerteza sobre o efeito da execução de cada acção.

Normalmente, o objectivo de um agente é obter a política óptima,  $\pi^*$ , que maximize o valor de reforço esperado. Uma política define o comportamento de um agente, determinando que acção deve ser executada em cada estado.

A *função de valor-estado*,  $V^\pi(s)$ , representa o valor de reforço esperado ao partir do estado,  $s \in \mathcal{S}$ , e prosseguindo infinitamente com a política  $\pi$ ,

$$V^\pi(s) = E_\pi \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t) \mid s_0 = s \right] \quad (2.1)$$

onde  $E_\pi$  é o valor de reforço esperado ao seguir  $\pi$ ,  $0 \leq \gamma < 1$  é um factor de desconto que impede o valor de reforço esperado tender para infinito, e  $R(s_t, a_t)$  representa o valor de reforço recebido, num dado instante, por executar a acção  $a$  no estado  $s$ .

A política óptima,  $\pi^*$ , é aquela que maximiza o valor de retorno esperado,

$$V^*(s) = \max_{\pi} V^\pi(s) = \max_{a \in \mathcal{A}} \left[ R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in \mathcal{S}} P(s' \mid s, a) V^*(s') \right] \quad (2.2)$$

onde  $P(s' \mid s, a)$  representa o valor da probabilidade de transição para o estado  $s'$  dada a decisão de executar a acção  $a$  no estado  $s$ .

Paralelamente a essas duas *funções de valor-estado*, existem duas *funções de valor-acção*,

$$Q^\pi(s, a) = E_\pi \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t) \mid s_0 = s, a_t = a \right] \quad (2.3)$$

e

$$Q^*(s, a) = R(s, a) + \gamma \sum_{s' \in \mathcal{S}} P(s' \mid s, a) V^*(s') \quad (2.4)$$

A *função de valor-acção* determina o valor de reforço esperado por escolher uma acção  $a$  num estado  $s$  de acordo com uma política  $\pi$ . A partir de  $Q^*$ , pode-se determinar  $V^*$  de forma simples,  $V^*(s) = \max_{a \in \mathcal{A}} Q^*(s, a)$ .

A aprendizagem por reforço é indicada quando se deseja obter a política óptima nos casos em que não se conhece *a priori* a função que modela tal política. No entanto, quando se tenta convergir para a política óptima, um aspecto importante a ter em conta é o conflito *exploração vs usufruto*. Isto é, por um lado o agente deve escolher as acções que maximizem o valor de reforço esperado (*usufruto*), mas por outro, deve agir de forma a atingir essa maximização, explorando acções pouco visitadas ou não visitadas (*exploração*). É importante por isso, estabelecer uma política para a exploração do espaço de pares estado-acção do agente. Uma política muito utilizada (e adoptada no simulador proposto na secção 4.3) é a política  $\epsilon$ -ambiciosa, que escolhe uma acção aleatória com probabilidade  $\epsilon$ , e escolhe de modo ambicioso (i.e. a acção com máximo valor estimado) com probabilidade  $1-\epsilon$  [Sutton & Barto, 1998].

### 2.2.1 Métodos para solução do problema

Esta secção descreve dois métodos que resolvem o problema da aprendizagem por reforço, i.e., os métodos Q-learning e SARSA. Estes métodos são baseados em diferenças temporais, i.e., actualizam depois de cada transição, a estimativa do valor do par estado-acção anterior de acordo com uma regra de actualização.

**Q-learning.** O método Q-learning é o método mais utilizado na aprendizagem por reforço. A sua regra de actualização segue a equação,

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha [R(s, a) + \gamma \max_{a' \in \mathcal{A}} Q(s', a') - Q(s, a)] \quad (2.5)$$

onde  $0 \leq \alpha < 1$  é um factor de aprendizagem e  $R(s, a)$  é o reforço obtido depois do sistema transitar do estado  $s$  para  $s'$  por efeito da acção  $a$ .

O Q-learning é um método fora-da-política ("off-policy") pois a *função de valor-acção*  $Q$  aprendida aproxima-se da *função de valor-acção* óptima  $Q^*$  sem depender da política utilizada. A convergência é garantida desde que todos os pares estado-acção sejam visitados infinitamente [Walkins & Dayan, 1992]. Na prática, a política de acções converge para a política óptima em tempo finito, embora de forma lenta.

**SARSA.** O método SARSA é uma modificação do Q-learning. A diferença é que não utiliza uma acção artificial no estado  $s'$ , i.e., a acção que maximiza  $Q$ . Em vez disso utiliza as acções da política que segue, daí ser chamado método dentro-da-política ("on-policy"). A sua regra de actualização é,

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha [R(s, a) + \gamma Q(s', a') - Q(s, a)] \quad (2.6)$$

onde  $a'$  é a próxima acção escolhida.

Este método pode aprender a política óptima, desde que escolha, no limite, sempre a acção com máximo valor estimado.

### 2.2.2 Modelação de um problema

Para modelar um problema na aprendizagem por reforço é necessário especificar,  $\mathcal{S}$ ,  $\mathcal{A}$  e  $R$ , onde:

- $\mathcal{S}$  é um conjunto finito de estados;
- $\mathcal{A}$  é um conjunto finito de acções, e;
- $R : \mathcal{S} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$  é a função de reforço, onde  $R(s, a)$  representa o valor do reforço recebido pelo agente quando decide executar a acção  $a \in \mathcal{A}$  no estado  $s \in \mathcal{S}$ .

A título exemplificativo apresenta-se um problema de aprendizagem por reforço e a sua respectiva modelação. No caso apresentado, dois vendedores de energia competem para vender 10 MW de energia, onde um deles, o vendedor 1, vende a sua energia sempre ao

mesmo preço, a 40€ (esta estratégia de licitação é apenas conhecida pelo vendedor 1), e o vendedor 2 pretende utilizar a aprendizagem por reforço para determinar a melhor forma de licitar a sua energia, de modo a maximizar o lucro. Neste caso, admite-se que a energia produzida tem um custo marginal constante de 2€/MW, totalizando a geração dos 10MW um custo de produção de 20€. Uma possível modelação da aprendizagem por reforço do vendedor 2 será:

- $\mathcal{S} = \{ quota0, quota50, quota100 \}$ , onde se caracterizam os 3 estados possíveis do agente, i.e., ou não vende nada e a sua quota de mercado é 0% (caso o preço da energia seja superior a 40€), ou os dois vendedores vendem a energia ao mesmo preço e ficam ambos com uma quota de mercado de 50% (caso o preço seja igual a 40€), ou o agente vende a sua energia toda e fica com uma quota de mercado de 100% (caso o preço seja inferior a 40€);
- $\mathcal{A} = \{ oferta35, oferta40, oferta45 \}$ , onde se especifica as estratégias de licitação do vendedor; neste caso são definidas 3 estratégias (simples e adequadas ao problema), i.e., vender a energia a 35, 40 ou 45 €, e;
- $R(s, a) = \underbrace{a \times s \times 10}_{receita} - \underbrace{s \times 20}_{despesa}$ , que indica o lucro obtido pelo vendedor quando vende a energia ao preço indicado por  $a \in \mathcal{A}$  estando com uma quota de mercado  $s \in \mathcal{S}$ . No simulador proposto (na secção 4) a função de reforço é idêntica, possui também a receita e a despesa, mas estas são obtidas de modo diferente; a receita depende do preço de fecho do mercado *Pool* e da quantidade de energia vendida; a despesa depende dos custos marginais das unidades que produzem a energia vendida. De salientar, que no simulador proposto o custo marginal não é constante (como no caso apresentado), este depende da tecnologia utilizada pela unidade de produção e da quantidade produzida.

### 2.3 Simuladores do Mercado Eléctrico

Desde a liberalização do mercado eléctrico que a indústria deixou de ser detida e operada apenas por uma única companhia, dando lugar a complexas interacções entre os vários participantes do mercado. Esta complexidade adiciona dificuldades a todos os participantes, principalmente aos licitadores de energia, que necessitam de ferramentas para

ajudá-los a compreender como se comporta o mercado e como devem agir em mercado. É neste contexto que os simuladores surgem e que têm vindo a ganhar relevância nestes últimos anos.

Os simuladores são, segundo [Shannon & Johannes, 1976], imitações do mundo real que visam avaliar, de uma forma económica, a estrutura e o comportamento de um sistema e/ou as decisões tomadas nesse sistema. Os simuladores do mercado eléctrico têm o mesmo propósito, havendo simuladores para as várias vertentes do mercado eléctrico, tal como analisar o congestionamento das linhas de transmissão [Kristiansen, 2003], planear investimentos [Botterud *et al.*, 2002] [Kilanc & Or, 2008], avaliar a estrutura do mercado [Contreras *et al.*, 2001b], apoiar a tomada de decisão [Hong *et al.*, 2001] [Harp *et al.*, 2000] e avaliar tipos de leilões [Contreras *et al.*, 2001a].

Mesmo tendo em conta o razoável número de vertentes que o mercado eléctrico possa ter, a comunidade científica tem desenvolvido uma grande variedade de simuladores, indo de simuladores simples, como [Contreras *et al.*, 2002], que servem apenas para jogar o mercado eléctrico, a simuladores multi-agente com aprendizagem, como [Bagnall & Smith, 2005], passando por outras abordagens como a utilizada no simulador SIMPEC, baseado na teoria de jogos, onde existe um modo de treino no qual são estimados valores para a quantificação das estratégias das empresas e um modo de simulação onde são utilizados os valores estimados para obter os preços de mercado e as quantidades por tecnologia e empresa [Sousa & Lagarto, 2007].

Dos vários simuladores existentes, nas diversas vertentes e tecnologias, destacam-se quatro simuladores, o PowerWeb, o AMES, o EMCAS e o MASCEM. Estes simuladores foram destacados por serem simuladores com relevo no sector eléctrico e por possuírem características que vão de encontro às áreas de investigação deste trabalho (i.e. apoio à tomada de decisão, sistemas multi-agente e modelação do mercado eléctrico). Existem no entanto outros trabalhos interessantes, como [Bunn & Oliveira, 2001] ou os destacados por [Weidlich & Veit, 2008] e [Sensfuß *et al.*, 2007], mas que face aos simuladores enunciados perdem relevância. Os simuladores comerciais (e.g. Gridview da ABB, MAPS da General Electric, Marketecture da Los Alamos National Laboratory, PROMOD IV da NewEnergy Associates, MARKETSYM da Henwood, PLEXOS da Energy Exemplar, UPLAN da LCG, NEMSIM da CSIRO), por serem comerciais, possuem uma descrição bastante vaga das suas características, deixando pouco claro a sua implementação e o seu

comportamento. Segundo se apurou, pelas características disponibilizadas nas páginas Web dos respectivos simuladores, estes não são multi-agente e apesar de alguns terem estratégias de licitação não é indicado se utilizam ou não aprendizagem para determinar que estratégias se deve utilizar.

A tabela 2.1 resume as principais características dos simuladores destacados da literatura. A coluna do *modelo de mercado* indica se o simulador suporta o modelo *Pool* (cf. secção 3.1.1), o modelo contratos bilaterais físicos (CBF) (cf. secção 3.1.2) ou outros modelos de mercado. A coluna da *procura fixa*, indica se os modelos de mercado utilizados são de venda ou são duplos (i.e. venda e compra). A coluna da *transmissão*, assinala os simuladores que têm em conta o congestionamento das linhas de transmissão na operação do mercado. A coluna da *aprendizagem* indica se são utilizados algoritmos de aprendizagem para apoio à tomada de decisão. A coluna *multi-agente* indica se o simulador é multi-agente. Por último, a coluna da *licença*, que indica o tipo de licença do simulador.

Nas próximas subsecções são detalhados os simuladores dispostos na tabela 2.1.

### 2.3.1 PowerWeb

Desenvolvido na *Cornell University*, o simulador PowerWeb<sup>8</sup> é um ambiente de simulação desenhado para testar e analisar diferentes tipos de mercados de electricidade. A versão mais recente do simulador (i.e. versão 2.7) disponibiliza apenas leilões de venda de energia para teste, onde se inclui o modelo *Pool*. Os leilões são chamados de venda porque têm a procura fixa [Zimmerman, 2001].

Neste simulador, os vendedores de energia podem licitar a energia da única unidade de produção que podem deter, de duas formas, i) explicitando o preço e quantidade dos blocos de licitação até perfazer o máximo de produção da unidade ou ii) escolhendo uma das seis estratégias disponíveis (e.g. licitar tudo a custo zero, licitar tudo a custo marginal, subir o preço dos blocos que foram transaccionados no dia anterior e descer o preço dos que não foram, licitar de forma aleatória).

A interacção do utilizador com o simulador é feita através de uma aplicação Web, o que potencia a utilização do simulador em âmbitos distribuídos [Zimmerman *et al.*, 1999].

<sup>8</sup> <http://www.pserc.cornell.edu/powerweb/>

	Modelo de Mercado	Procura Fixa	Transmissão	Aprendizagem	Multi-Agente	Licença
<b>PowerWeb</b>	<i>Pool</i> e outros	Sim	Não	Não	Não	Livre
<b>AMES</b>	<i>Pool</i>	Não	Sim	Sim	Sim	Código aberto
<b>MASCEM</b>	<i>Pool</i> e CBF	Não	Não	Sim	Sim	Projecto de Investigação
<b>EMCAS</b>	<i>Pool</i> , CBF e outros	Não	Sim	Sim	Sim	Comercial

TABELA 2.1: Características dos principais simuladores do mercado eléctrico.

Por outro lado, este sistema de simulação não tem flexibilidade para modelar e simular o comportamento de um licitador (i.e. permite apenas tomada de decisão humana), não suporta o mercado de CBF, não tem em conta a congestão das linhas de transmissão, e as tomadas de decisão são apenas baseadas nos custos de arranque e paragem das unidades de produção.

### 2.3.2 AMES

O simulador AMES <sup>9</sup> (Agent-based Modeling of Electricity Systems) é um simulador multi-agente desenvolvido com a plataforma Repast (cf. secção 2.1.2) por uma equipa de investigadores da Iowa State University. O seu objectivo é melhorar a investigação e o ensino nos mercados de electricidade, não tendo quaisquer intuito comercial.

O AMES é um simulador para mercados de pequena e média dimensão, onde os agentes licitadores têm capacidade de aprendizagem, utilizando o algoritmo "Variant Roth-Erev" (VRE) [Sun & Tesfatsion, 2007b] [Li *et al.*, 2008]. Neste simulador, o utilizador não tem ao seu dispor estratégias de licitação para aplicar às unidades de produção, apenas pode escolher o algoritmo de aprendizagem que pretende utilizar (i.e. o algoritmo VRE, mas está preparado para mais). No entanto, tem em conta a congestão das linhas de transmissão na realização do mercado [Sun & Tesfatsion, 2007a].

### 2.3.3 MASCEM

O simulador MASCEM (Multi Agent Simulation system for Competitive Electricity Markets) é um simulador multi-agente para o mercado eléctrico desenvolvido em OAA (Open Agent Architecture) (cf. secção 2.1.2) e em Java [Praça *et al.*, 2003a]. Pretende-se com este simulador avaliar as decisões dos agentes de mercado, em particular, dos agentes compradores de energia (i.e. consumidores e comercializadores) e dos agentes vendedores (i.e. produtores) por serem elementos chave no funcionamento do sistema eléctrico.

Sendo este um simulador de apoio à tomada de decisão, pode-se incluir dois tipos de mercado, o tipo *Pool* e o tipo CBF, para o utilizador escolher e aprender a melhor forma de negociar em qualquer um deles. Estes mercados podem funcionar em separado ou ao mesmo tempo, não se contemplando em ambos os casos o congestionamento do sistema

<sup>9</sup> <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/AMESMarketHome.htm>

de transmissão [Praca *et al.*, 2001]. Também por ser um simulador de apoio à tomada de decisão, inclui estratégias de licitação de venda de energia. O agente pode utilizar estratégias dinâmicas, que são estratégias dependentes do tempo e estratégias dependentes do comportamento (cf. [Praça *et al.*, 2003b]), ou utilizar a estratégia indicada pelo simulador, que tem em conta não só os resultados do dia anterior mas também possíveis resultados de outros agentes e futuras reacções. Esta estratégia utiliza informação histórica sobre o comportamento do mercado e sobre o comportamento e características de outros agentes, obtida através de técnicas de extracção de conhecimento ("Data Mining"), para construir uma grelha de resultados com cada jogada. Esta grelha é depois analisada, através de conceitos da Teoria de Jogos, como um jogo de estratégia-pura com dois jogadores, assumindo que cada jogador procura minimizar o máximo possível as perdas e maximizar o mínimo possível o ganho [Praça *et al.*, 2008].

### 2.3.4 EMCAS

O simulador EMCAS <sup>10</sup> (Electricity Market Complex Adaptive System), desenvolvido pela "Argonne National Laboratory" (ANL), é um simulador multi-agente, implementado em Java através do Repast (cf. secção 2.1.2). Este simulador possui actualmente grande relevo no mercado eléctrico mundial sendo utilizado, por exemplo, na Europa, Ásia e Estados Unidos.

Com este simulador é possível representar vários mercados (e.g. mercado de CBF, mercado *Pool*) tendo em conta a congestão das linhas de transmissão [Veselka *et al.*, 2002]. Nele, os agentes licitadores possuem aprendizagem, explorando as várias estratégias de licitação disponíveis, e verificando através dos parâmetros de retorno do mercado, se é proveitoso manter a estratégia de licitação actual ou se é melhor experimentar outra [Conzelmann *et al.*, 2005] [North *et al.*, 2002].

Este simulador é correntemente utilizado pela REN para analisar o MIBEL, tendo inclusive, com a parceria da EDP e da Direcção-Geral de Energia e Geologia, desenvolvido um projecto em conjunto com a ANL para integrar a ferramenta VALORAGUA da EDP no EMCAS [Thimmapuram *et al.*, 2008].

---

<sup>10</sup> <http://www.adica.com/emcas.html>



## Capítulo 3

# Mercado Eléctrico

A organização típica do sector eléctrico, até à década de 80, era baseada em empresas verticalmente integradas responsáveis por todas as funções do mercado (i.e. produção, transporte, distribuição e gestão do mercado). Esse modelo de monopólio tem sido alterado ao longo dos anos, quer na Europa (e.g. Noruega, Suécia, Finlândia, Alemanha, Inglaterra), quer no resto do mundo (e.g. Estados Unidos) através da liberalização e da integração dos mercados eléctricos.

A liberalização dos mercados visa aumentar a concorrência, esperando-se reflexos ao nível dos preços e da melhoria da qualidade de serviço, que deverá corresponder a uma maior satisfação dos consumidores de energia eléctrica. Para tal, as várias actividades do mercado eléctrico foram separadas, ficando a produção e comercialização inteiramente abertas à concorrência enquanto que, o transporte e distribuição - enquanto monopólios naturais (uma vez que a duplicação destas estruturas torna-se economicamente ineficiente face aos elevados custos inerentes ao investimento associado) - permanecem actividades exercidas em regime de serviço público e em exclusivo, sendo garantido o acesso de terceiros às redes em condições de transparência e não discriminação.

Um aspecto com fortes implicações na liberalização consiste na integração de mercados. Este é um aspecto distinto da liberalização pois é possível promover a liberalização de um mercado sem o integrar com outro, assim como é possível integrar dois mercados que não estejam liberalizados. No entanto, a integração de mercados apresenta-se como um factor catalisador do processo de liberalização, uma vez que mitiga problemas de poder de mercado e aumenta a eficiência económica global.

Ao nível europeu está em curso a criação do Mercado Interno da Electricidade, que será construído a partir da integração progressiva de mercados regionais de âmbito supranacional como sejam a NordPool, formada pela Noruega, Suécia, Finlândia e Dinamarca, e o Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL) resultante da integração dos mercados de energia eléctrica de Portugal e Espanha.

Do ponto de vista histórico, Portugal tinha um mercado de energia eléctrica intervencionista e monopolista, com empresas verticalmente integradas (i.e. EDP), com o objectivo de garantir a segurança de todo o sistema. A segurança do abastecimento era nessa altura mais importante que a qualidade e a possibilidade de conceder a melhor prestação ao consumidor. Contudo, seguindo o rumo das reformas iniciadas pela União Europeia no sector eléctrico, Portugal abriu o seu mercado de forma progressiva entre 1995 e 2006, tendo a liberalização do mercado ficado completa, precisamente, no dia 4 de Setembro de 2006 [ERSE, 2007]. Esta liberalização ocorreu muito depois da da Espanha, cuja liberalização ficou estabelecida em Janeiro de 1998 [Pinto, 2001], mas antecipando a data imposta pela Directiva n.º 2003/54/CE, que estabelecia o prazo máximo no dia 1 de Julho de 2007, dia em que foram integrados os dois mercados e que começou a laborar oficialmente o mercado MIBEL.

Nas próximas secções é descrita a estrutura do MIBEL e o seu modelo de mercado, descrevendo-se também, os modelos típicos de mercado que suportam o modelo de mercado do MIBEL.

## 3.1 Modelos de Mercado

Dois dos principais modelos de mercado utilizados no mercado eléctrico, i.e., o modelo Pool e o modelo de contratos bilaterais físicos, são apresentados nas subsecções seguintes.

### 3.1.1 Modelo Pool

O modelo Pool é constituído por um mercado "spot" onde vendedores e compradores submetem ofertas de pares quantidade-preço pela energia que desejam negociar em mercado. O termo "spot", é um termo usado para designar mercados onde se negocia activos para entrega imediata, em contraste com os mercados onde se negocia activos para entrega

futura, designados por mercado a prazo. A Pool ao receber estas ofertas agrega-as em duas curvas, uma para a venda e outra para a compra, segundo uma ordem de mérito. Nas ofertas de venda a ordem de mérito é da mais barata para a mais cara, nas ofertas de compra é da mais cara para a mais barata. No ponto de intersecção destas duas curvas é retirado o preço de fecho de mercado, ao qual toda a quantidade de energia até esse ponto é transaccionada (vendida e comprada), como mostra a figura 3.1.

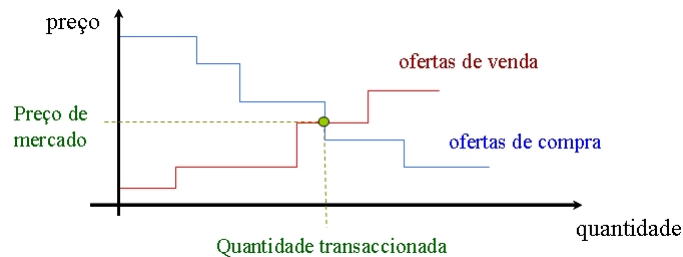


FIGURA 3.1: Modelo Pool.

Com este tipo de mercado os vendedores e compradores submetem ofertas para as quantidades de energia que pretendem negociar, competindo para conseguir transaccionar a energia e não por clientes específicos. Se as ofertas de venda forem demasiado altas, os vendedores podem não vender toda a energia que têm disponível, implicando menos receita, premiando assim os vendedores com custos mais baixos. Por outro lado, os compradores competem para comprar a energia que necessitam, podendo não conseguir comprá-la caso as suas ofertas sejam demasiado baixas.

### 3.1.2 Modelo de Contratos Bilaterais Físicos

Os contratos bilaterais físicos (CBF) são contratos de longo prazo (tipicamente com duração mínima de um ano) estabelecidos directamente e livremente entre duas partes, onde uma compromete-se a colocar a energia eléctrica na rede (vendedor) e a outra a receber a energia eléctrica contratada (comprador). Os preços e condições do contrato são negociáveis.

Este modelo é um modelo rígido, i.e., garante segurança em relação ao preço uma vez que este é fixado para um longo período de tempo. Contudo, tem a desvantagem de possuir um custo elevado na negociação e escrita dos contratos.

## 3.2 Estrutura do Mercado Ibérico de Electricidade

Os sistemas eléctricos existentes são, regra geral, estrutural e operacionalmente semelhantes, contemplando as funções físicas de produção, transporte, distribuição, consumo e gestão do sistema. O Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL) para além das componentes enunciadas possui também outras entidades como os comercializadores e os agentes externos.

A figura 3.2 apresenta a estrutural organizacional do MIBEL e os fluxos possíveis entre as partes do sistema.

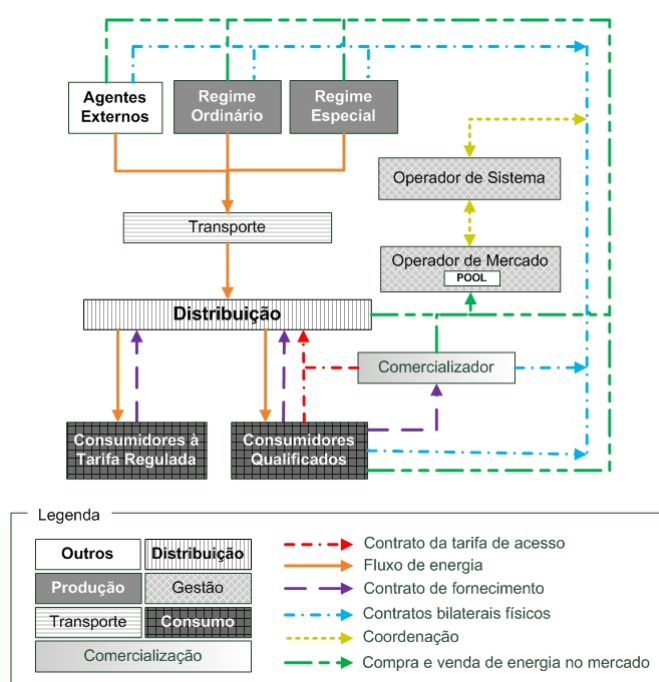


FIGURA 3.2: Estrutura do MIBEL.

Nas próximas subsecções são detalhadas as diversas componentes do mercado eléctrico anteriormente apresentado.

### 3.2.1 Produção

A electricidade necessária para satisfazer o consumo é gerada em centros de produção, também designados por grupos, centrais ou unidades, onde uma fonte de energia primária é convertida em energia eléctrica. A energia eléctrica produzida é depois encaminhada para a rede de transporte, em alta ou muito alta tensão, que a entrega às redes

de distribuição, em níveis de tensão mais baixos, para satisfação das necessidades dos consumidores finais.

Os produtores podem vender a energia produzida através de contratos bilaterais físicos estabelecidos com comercializadores e consumidores qualificados, ou indo directamente a mercado.

A produção de electricidade é dividida em dois regimes: i) produção em regime ordinário, relativa à produção de electricidade com base em fontes tradicionais não renováveis e em grandes centros electroprodutores hídricos, e ii) produção em regime especial, relativa à cogeração e à produção eléctrica a partir da utilização de fontes de energia renováveis.

A próxima subsecção introduz as diferentes tecnologias de geração, com base em [Breeze, 2005] e [Gómez-Expósito *et al.*, 2008], salientando as tecnologias convencionais por serem utilizadas no simulador proposto (cf. secção 4.1.1).

### 3.2.1.1 Tecnologias de Geração

As tecnologias de geração são normalmente associadas ao tipo de combustível que utilizam. Exemplo disso são as centrais convencionais, que normalmente estão divididas em três tipos: centrais hídricas, centrais térmicas convencionais e centrais nucleares. O modo como estas centrais transformam energia primária em energia eléctrica é ilustrado na figura 3.3.

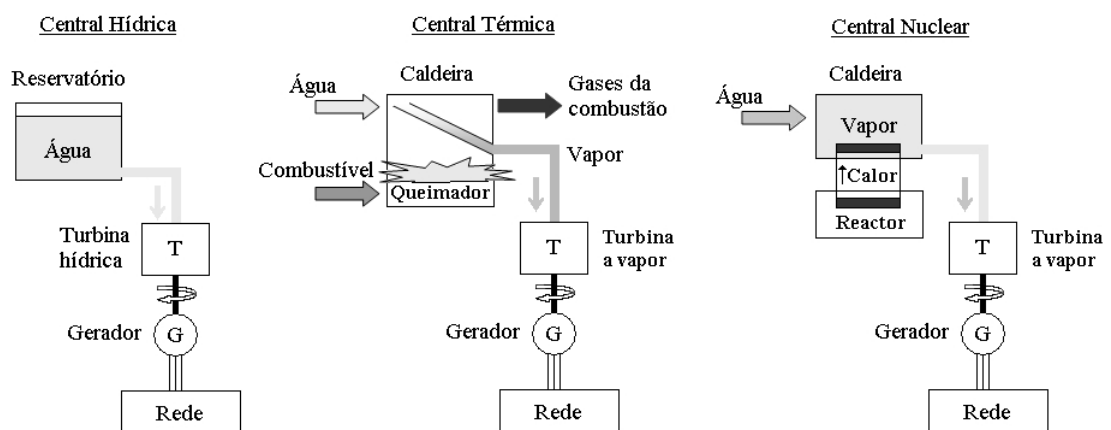


FIGURA 3.3: Tecnologias Convencionais de Geração.

Devido à fonte de energia primária utilizada (i.e. a água), as centrais hídricas produzem menos poluição que qualquer outra tecnologia de geração convencional. Outra vantagem

associada a este tipo de central, a juntar à não poluição e ao custo da fonte primária de energia, é a sua flexibilidade de conexão e desconexão, tornando esta tecnologia altamente regulável e conveniente para ajustar a produção à necessidade da procura. Contudo, o seu elevado custo de construção e o facto de ser necessário submergir vastas áreas para garantir uma quantidade constante de água, tornam-na menos atractiva. A adicionar a estas desvantagens ainda há o facto da sua operação ser dependente dos aguaceiros na zona onde está situada.

As centrais a vapor ou térmicas (figura 3.3, ao centro) possuem uma energia primária proveniente de combustíveis fósseis (e.g. carvão, fuelóleo, gás), que sendo bens não renováveis tendem a ficar mais caros ao longo dos anos. A adicionar ao custo do combustível, há também o facto deste tipo de central ser menos flexível que outros tipos existentes. Este facto deve-se às propriedades de inércia do calor da caldeira de vapor (cerca de 7 horas) que fazem com que não possa ser imediatamente ligada e desligada.

O rendimento ou eficiência termal neste tipo de central depende essencialmente do poder calorífico inferior do combustível utilizado, (i.e. da energia libertada pelo combustível na forma de calor quando este entra em combustão). Em qualquer caso, a maior eficiência atingida nunca ultrapassará os 45%.

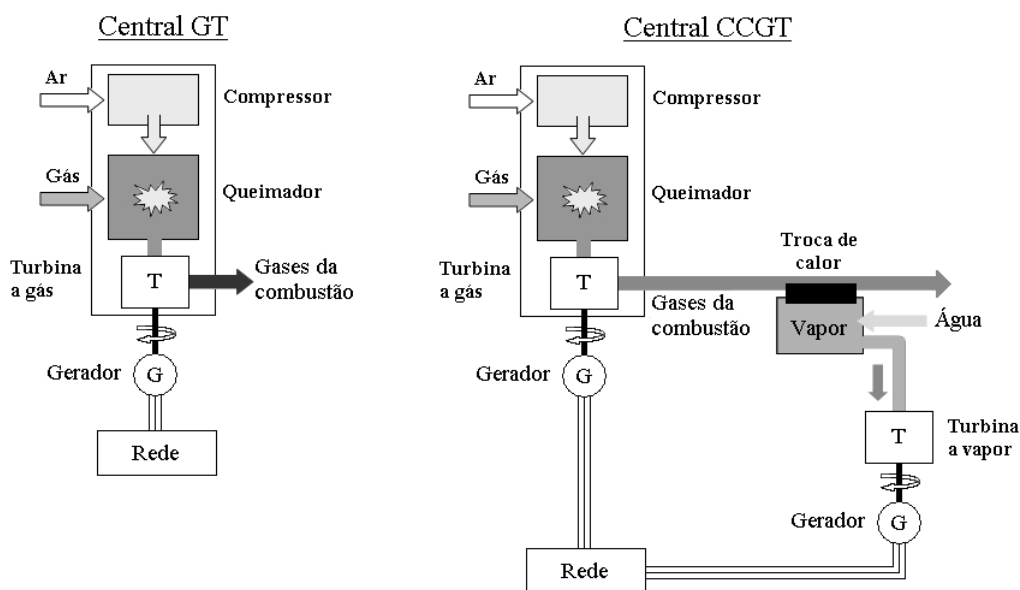


FIGURA 3.4: Central GT e Central CCGT.

Existem duas tecnologias térmicas que usam o gás como combustível, como mostrado na figura 3.4. Do lado esquerdo, temos uma central com turbina a gás (GT) onde

a combustão do gás a alta pressão alimenta uma turbina. Do lado direito, está uma central de ciclo combinado ou de ciclo combinado com turbina a gás (CCGT), que é actualmente a tecnologia mais utilizada para produzir energia eléctrica. A operação desta central, como se pode inferir pelo nome, envolve dois tipos de ciclos e graças aos avanços na cerâmica, o desempenho nestes ciclos é substancialmente maior que os ciclos convencionais com turbinas a vapor, com a eficiência termal a chegar em alguns casos aos 60%. Isto juntamente com a considerável redução de emissões poluentes, o alto grau de modularidade e os custos razoáveis de investimento, fazem da CCGT uma das tecnologias mais competitivas de geração disponíveis.

As centrais nucleares (ver figura 3.3, lado direito), também conhecidas por centrais atómicas, consistem essencialmente num reactor nuclear que produz uma grande quantidade de calor através da fissão atómica do urânio.

Existem duas desvantagens na energia nuclear que são difíceis de resolver e que a tornam socialmente inaceitável em alguns países: a magnitude de uma catástrofe no caso de acidente, apesar de o risco ser baixo, e o problema da eliminação dos resíduos radioactivos.

A maioria da produção energética presente na rede eléctrica tem origem nas chamadas centrais convencionais, descritas anteriormente. No entanto, existem outros tipos de centrais que estão a adquirir gradual significância em certas regiões e países. Estas são muitas vezes chamadas energias alternativas, caracterizadas pelo seu impacto ambiental reduzido e por usarem energias renováveis: centrais eólicas, centrais solares, centrais de biomassa (matéria orgânica de origem animal e vegetal), centrais de cogeração (combinam energia eléctrica e energia térmica), entre outras. Destas tecnologias, a energia eólica é a que mais se destacada devido ao seu crescimento acentuado nos últimos anos.

### 3.2.2 Transporte

A rede de transporte do sistema eléctrico assegura o escoamento da energia produzida nas centrais até às redes de distribuição, que a conduzem depois às instalações de consumo.

No MIBEL, as empresas transportadoras responsáveis pelas redes são a REN <sup>1</sup>, em Portugal, e a REE <sup>2</sup>, em Espanha. Estas empresas são orientadas exclusivamente para

---

<sup>1</sup> <http://www.ren.pt/>

<sup>2</sup> <http://www.ree.es/>

a construção, manutenção e gestão técnica das redes, de forma a permitir o acesso de terceiros à rede e a gerir de forma eficiente as infra-estruturas, não podendo comprar ou vender energia.

### 3.2.3 Distribuição

As redes de distribuição possibilitam o escoamento da energia eléctrica recebida da rede de transporte para as instalações consumidoras. Além de servirem o mercado regulado, podem também ser utilizadas pelos comercializadores ou consumidores qualificados, mediante o pagamento de uma tarifa de acesso.

Actualmente, a concessão para a actividade de distribuição de electricidade em média e baixa tensão pertence à EDP Distribuição <sup>3</sup>, no lado português, e à Endesa Distribución Eléctrica S.L. , Iberdrola Distribución Eléctrica <sup>4</sup>, Unión Fenosa Distribución <sup>5</sup>, Hidrocarbónico Distribución Eléctrica <sup>6</sup>, entre outras, no lado espanhol.

### 3.2.4 Comercialização

Esta actividade consiste na aquisição de electricidade através de contratos bilaterais físicos ou indo directamente ao mercado organizado, e sua revenda a consumidores qualificados ou a outros agentes do sistema, podendo também vender em mercado caso tenha adquirido a energia em outros países ou a produtores nacionais. As empresas comercializadoras podem portanto comprar e vender electricidade livremente e têm o direito de aceder à rede de distribuição mediante o pagamento de tarifas reguladas.

### 3.2.5 Gestão

A gestão do sistema eléctrico está entregue a duas entidades independentes, i) ao operador de mercado e ii) ao operador de sistema. O operador de mercado tem como tarefa principal a gestão económica do sistema. O operador de sistema tem como função principal manter a viabilidade física das redes de modo a sustentar a parte económica. As

<sup>3</sup> <http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/EDPDistribuicao/>

<sup>4</sup> <http://www.iberdrola.es/>

<sup>5</sup> <http://www.uef.es/>

<sup>6</sup> <http://www.h-c.es/>

próximas subsecções descrevem de forma mais extensa o papel destas duas entidades no mercado.

**Operador de mercado.** O Operador do Mercado Ibérico de Energia - Pólo Português <sup>7</sup> (OMIP) e o "Operador del Mercado Ibérico de Energía - Polo Español" <sup>8</sup> (OMEL) são, por um período transitório e até à criação do Operador do Mercado Ibérico (OMI) Único, as entidades responsáveis pela gestão económica do mercado, garantindo o seu eficaz desenvolvimento. As suas funções são operar os mercados do MIBEL (cf. secção 3.3), realizar as comunicações derivadas da operação dos mercados, difundir a informação pública, coordenar-se com outros mercados internacionais, cooperar com outras entidades em matéria de previsões da cobertura da procura e informar os administradores sobre comportamentos contrários ao correcto funcionamento do mercado [OMEL, 2007].

**Operador de sistema.** O operador de sistema tem como função principal garantir o equilíbrio técnico das redes, através da programação e gestão dos mecanismos destinados a lidar com os congestionamentos, visto as linhas de transmissão terem um limite máximo de tráfego de Mega Watts (MW). Este equilíbrio deve ser justo e não discriminatório. É sua função propor e aplicar os critérios de segurança, garantir o acesso à rede de transporte, propor a planificação da mesma e estabelecer os requerimentos para a regulação do sistema [OMEL, 2007].

No MIBEL, a operação do sistema é efectuada pela REN <sup>9</sup>, no lado português, e pela REE <sup>10</sup>, no lado espanhol.

### 3.2.6 Consumo

A energia eléctrica tem como destino final o sector residencial, industrial, comercial e rural. Com a liberalização do mercado todos estes clientes passaram a ser elegíveis, isto é, passaram a poder escolher livremente o seu fornecedor de energia eléctrica.

Os consumidores podem optar por ser, i) consumidores à tarifa regulada, contratando o fornecimento de electricidade a uma empresa de distribuição (sendo o preço da energia

---

<sup>7</sup> <http://www.omip.pt/>

<sup>8</sup> <http://www.omel.es/>

<sup>9</sup> <http://www.ren.pt/>

<sup>10</sup> <http://www.ree.es/>

fixado por decreto) ou se o desejarem, podem ser ii) consumidores qualificados, podendo adquirir livremente a energia eléctrica, indo ao mercado organizado; subscrevendo contratos bilaterais físicos com empresas comercializadoras, com produtores do regime especial ou ordinário, e com agentes externos; ou ainda, por contrato de fornecimento de energia a empresas distribuidoras ou comercializadoras.

### 3.2.7 Outras entidades

**Agente Externo.** Os agentes externos são entidades autorizadas a entregar ou receber energia eléctrica proveniente de outros sistemas exteriores aos sistemas eléctricos de Portugal e Espanha.

## 3.3 Modelo do Mercado Ibérico de Electricidade

O modelo do Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL) é a conjugação dos seguintes mercados:

- mercado de contratação bilateral física;
- mercado a prazo;
- mercado diário, e;
- mercado intradiário.

Sendo o OMIP responsável pela negociação a prazo, enquanto a OMEL encarrega-se da negociação diária e intradiária.

O **mercado de contratação bilateral física** segue o modelo de contratos bilaterais físicos (cf. secção 3.1.2), sendo permitido contractos (com duração mínima de 1 ano) entre todo o tipo de produtores, comercializadores e consumidores qualificados. Todos os contractos estabelecidos são depois comunicados ao operador de sistema, de modo a assegurar a capacidade de transmissão necessária para completar as transacções.

O **mercado a prazo** segue o modelo Pool (cf. secção 3.1.1) e permite aos compradores e vendedores estabelecerem contratos de energia para diversos períodos de duração

(semanal, mensal, trimestral ou anual), fixando-se o preço da transacção no preço de fecho do mercado. Este mercado permite aos participantes beneficiar da transparência e do anonimato na negociação, bem como da interposição da OMIClear enquanto Contraparte Central de todas as operações, permitindo a eliminação do risco de crédito de contraparte.

O **mercado diário** é o mercado no qual se realizam a maioria das transacções de energia. Este mercado segue o modelo Pool (cf. secção 3.1.1) e é realizado para cada hora do dia seguinte. Do lado da venda operam todas as unidades de produção disponíveis e agentes externos registados como vendedores. Do lado da procura, os distribuidores, comercializadores, consumidores qualificados e agentes externos registados como compradores.

Depois do operador de mercado realizar o mercado diário, informa o operador de sistema para este analisar o programa resultante do mercado a prazo, do mercado diário e dos contratos bilaterais físicos de modo a garantir a fiabilidade e a segurança de abastecimento. No caso da existência de restrições técnicas, o operador de sistema coordena em conjunto com o operador de mercado um novo programa para resolver essas restrições.

Por último, o **mercado intradiário**. O mercado intradiário é um mercado que permite ajustar o programa diário viável, estando estruturado actualmente em seis sessões. Neste mercado podem participar as unidades de produção, os distribuidores, os comercializadores, os consumidores qualificados e os agentes externos mediante algumas restrições. No caso de serem compradores e para poderem acorrer ao mercado intradiário, têm de ter participado na correspondente sessão do mercado diário ou na execução de um contrato bilateral físico. No caso de serem produtores têm de ter participado na correspondente sessão do mercado diário, na execução de um contrato bilateral físico, ou ter estado indisponível para a sua participação no mercado diário e ter ficado disponível posteriormente.

O mercado diário, onde incide o simulador proposto (cf. secção 4.1), é detalhado na próxima subsecção.

### 3.3.1 Mercado Diário

O mercado diário, como parte integrante do mercado eléctrico, tem por objectivo levar a cabo as transacções de energia eléctrica para o dia seguinte mediante a apresentação

de ofertas de venda e de aquisição de energia eléctrica ao operador de mercado por parte dos agentes do mercado.

As ofertas de venda apresentadas pelas unidades de produção e pelos agentes externos autorizados, podem ser simples ou complexas [OMEL, 2006].

As **ofertas simples** são ofertas económicas de venda de energia que os vendedores apresentam para cada período horário e unidade de produção da qual sejam titulares, com expressão de um preço, que pode ser zero, e de uma quantidade de energia.

As **ofertas complexas** são aquelas que, cumprindo com os requisitos exigidos para as ofertas simples, integram também condições de indivisibilidade, de receita mínima, de paragem programada ou de gradiente de carga (ver apêndice A)

Nas ofertas de aquisição, temos os distribuidores, comercializadores, consumidores qualificados e agentes externos cuja participação esteja autorizada. Os distribuidores dirigem-se ao mercado para adquirir a electricidade que necessitam para fornecer aos consumidores pela tarifa regulada. Os comercializadores vão a mercado para adquirir energia para vender aos consumidores qualificados. Os consumidores qualificados podem adquirir energia directamente no mercado organizado, assinando um contrato bilateral físico com um produtor ou ainda permanecendo como consumidor pela tarifa regulada. Os agentes externos podem participar directamente no mercado ou assinar contratos bilaterais com produtores ou comercializadores.

As ofertas de venda e de compra poderão ter no máximo 25 blocos de licitação para cada hora sendo o preço crescente em cada bloco, no caso das vendas, e decrescente no caso das compras.

O operador do mercado realizará o encontro das ofertas económicas de compra e venda seguindo o modelo Pool, por meio de um método simples ou complexo, consoante concorram somente ofertas simples ou caso existam ofertas com condições complexas. O método simples é aquele que obtém de maneira independente o preço de mercado para cada período horário de programação. O método complexo obtém o resultado a partir do método simples, acrescentando as condições de indivisibilidade e gradiente de carga, de forma a obter uma solução simples condicionada. Mediante um processo repetitivo obtêm-se várias soluções simples condicionadas até que todas as unidades de oferta satisfaçam a condição de receita mínima e a condição de paragem programada, sendo esta

solução a primeira solução final provisória, obtida ao considerar-se uma capacidade ilimitada nas interligações. Depois, novamente através de um processo repetitivo, obtém-se a primeira solução final definitiva no que se refere à capacidade máxima das interligações internacionais, considerando tanto as ofertas realizadas no mercado diário, como as execuções de contratos bilaterais físicos e o mercado a prazo. No caso de congestão interna no Mercado Ibérico (congestão na interligação entre os sistemas eléctricos espanhol e português) repete-se o processo referido previamente realizando-se uma separação de mercados ("Market Splitting") obtendo-se um preço em cada zona do Mercado Ibérico, sem congestão interna entre ambos os sistemas eléctricos.

Ainda dentro do processo do mercado diário, os operadores do sistema obtêm o Programa Diário Viável mediante a incorporação das mudanças necessárias para a resolução das restrições técnicas identificadas, na sua zona respectiva.

A título elucidativo apresentam-se as curvas agregadas de oferta e procura verificadas no Mercado Diário do MIBEL no dia 25 de Setembro de 2008 às 11 horas, sem separação de mercados.

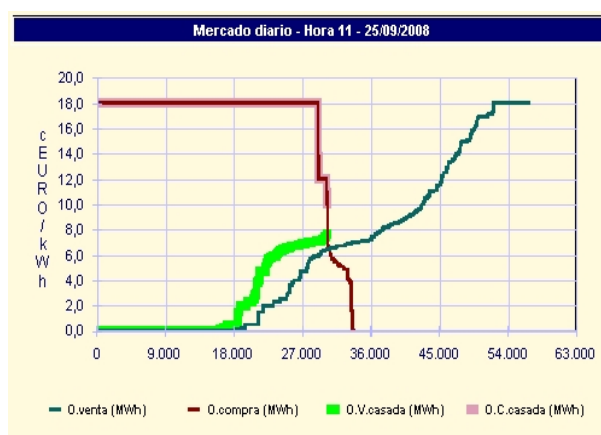


FIGURA 3.5: Curvas agregadas do oferta e procura no Mercado Diário do MIBEL.



## Capítulo 4

# Simulador Proposto

Este capítulo descreve o simulador multi-agente proposto para o mercado eléctrico.

A descrição do simulador é dividida em três secções. Na primeira secção apresenta-se o modelo de mercado adoptado, que reflecte algumas características do MIBEL (cf. secção 3.2), nomeadamente, do mercado diário do MIBEL. Na secção 4.2, concretiza-se o modelo apresentado na secção anterior num sistema multi-agente, mapeando-se as entidades do sistema eléctrico em agentes, através da plataforma INGENIAS. Por fim, na secção 4.3, descreve-se o método de aprendizagem adoptado (i.e. o método Q-learning) para apoiar as empresas produtoras de energia na sua tomada de decisão.

### 4.1 Mercado Eléctrico

O mercado eléctrico proposto inclui quatro tipos de entidades:

- i. as unidades produtoras, onde é gerada a energia eléctrica;
- ii. as empresas produtoras, que detêm unidades produtoras e que licitam a sua energia em mercado;
- iii. o comprador de energia, representando todo o consumo, e;
- iv. o operador de mercado, que gere um modelo de mercado *Pool* (cf. secção 3.1.1).

Estas entidades comunicam entre si de modo a dinamizar o mercado eléctrico. Os fluxos de informação existentes podem ser divididos em dois grupos, i) o grupo relativo aos custos marginais, que diz respeito à comunicação entre a empresa produtora e as suas unidades de produção, e ii) o grupo de fluxos necessários para realizar o mercado *Pool*, que inclui o pedido e envio das ofertas de venda e de compra, e posterior envio dos resultados do mercado por parte do operador de mercado.

A figura 4.1 ilustra a estrutura e os fluxos de informação do mercado eléctrico proposto. Os fluxos com a seta preenchida a branco representam um pedido de dados, as restantes setas o envio de dados. Os números 1 e 2 indicam a ordem da comunicação.

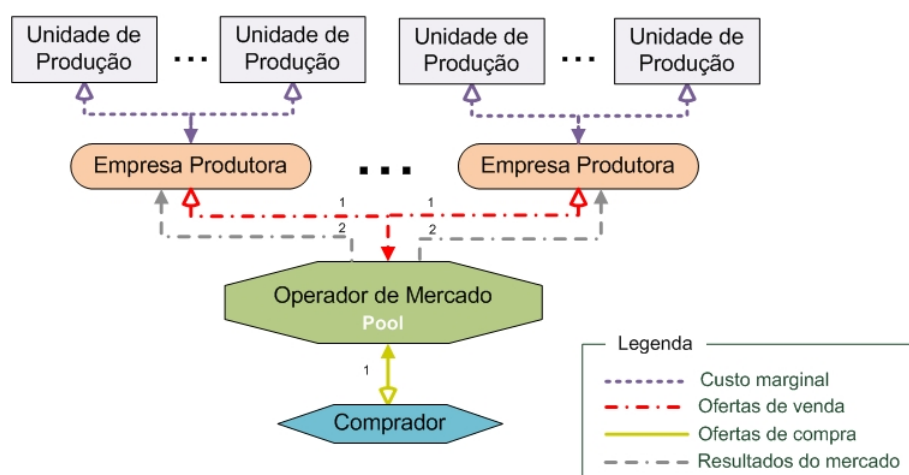


FIGURA 4.1: Estrutura e fluxos de informação do mercado eléctrico.

As próximas subsecções detalham as entidades presentes na figura 4.1.

#### 4.1.1 Unidades de produção

As unidades de produção, ou "generating units" (*GenUnits*), do simulador proposto fazem parte do conjunto das centrais do regime ordinário do MIBEL (cf. secção 3.2.1). Este simulador modela centrais térmicas convencionais e centrais nucleares. As centrais hídricas não foram modeladas porque possuem características diferentes das restantes centrais.

As *GenUnits* modeladas possuem a seguinte informação:

- nome da unidade e país onde se encontram;

- tecnologia utilizada na geração da energia;
- tipo de combustível que a tecnologia necessita;
- o rendimento da unidade;
- a capacidade mínima de produção, que indica o limiar a partir do qual a produção de energia é técnica e economicamente viável;
- a capacidade máxima de produção que a unidade atinge;
- o tempo de arranque que é necessário para a unidade começar a produzir;
- o tempo de paragem que é necessário para uma central parar de produzir;
- o custo de arranque da unidade, i.e., o custo de colocar em funcionamento uma unidade depois desta ter estado parada;
- o custo de paragem, que representa o desaproveitamento de combustível; geralmente é menor que o custo de arranque;
- o custo variável de operação e manutenção, que deverá cobrir todos os custos operacionais da unidade incorridos durante o funcionamento da mesma;
- o custo fixo de operação e manutenção, que deverá cobrir todos os custos operacionais da unidade incorridos independentemente do funcionamento da mesma;
- os patamares de "heat rate", ou seja, os níveis de calor necessário para produzir diversas quantidades de energia, e;
- a fórmula de cálculo utilizada para determinar o custo marginal da *GenUnit*.

Todos os valores referidos deverão ser indicados pelo utilizador caso a fórmula de cálculo do custo marginal assim o indique. Para calcular o custo marginal de uma *GenUnit* são disponibilizadas duas fórmulas, intituladas, `WithHeatRate` e `WithProductivity`.

**Fórmula `WithHeatRate`.** A fórmula `WithHeatRate`, utilizada por [Botterud *et al.*, 2008], obtém o custo marginal,  $CM$ , através do custo variável de operação e manutenção,  $vO\&M$ , e dos patamares de "heat rate" que a unidade de produção possui,  $nPat$ ,

utilizando a capacidade de cada patamar,  $cap$ , e o correspondente valor de "heat rate",  $hr$ . O preço do combustível utilizado pela unidade é indicado por,  $prComb$ .

$$CM_{i+1} = vO\&M + \frac{(cap_{i+1} \times hr_{i+1}) - (cap_i \times hr_i)}{cap_{i+1} - cap_i} \times prComb, i \in [1, nPat] \quad (4.1)$$

A respectiva capacidade do bloco,  $CapBloco$ , é dada pela equação 4.2.

$$CapBloco_{i+1} = cap_{i+1} - cap_i, i \in [1, nPat] \quad (4.2)$$

A título de exemplo temos a tabela 4.1 onde se aplica a equação 4.1 para determinar o custo marginal da unidade de produção (coluna 4), e a equação 4.2 para determinar a capacidade do bloco correspondente (coluna 3). Os vários patamares de "heat rate" da unidade são apresentados na coluna 1 e 2 da tabela. Os cálculos efectuados têm  $vO\&M$  a valer 1.75 e  $prComb$  a valer  $1.5 \times 10^{-3}$ .

$cap$	$hr$	$CapBloco$	$CM$
250	12000	n.a.	n.a.
350	10500	350	11,9
400	10090	50	12,5
450	9770	50	12,7

TABELA 4.1: Exemplo de utilização da fórmula WithHeatRate.

**Fórmula WithProdutivity.** A fórmula WithProdutivity, utilizada por [Sousa, 2005], obtém o custo marginal,  $CM$ , através do rendimento da unidade,  $\eta$ , do preço do combustível,  $prComb$ , do custo variável de operação e manutenção,  $vO\&M$ , e do custo de CO2,  $custoCO2$ .

$$CM = \frac{prComb \times FC}{PCI \times \eta} + custoCO2 + vO\&M \quad (4.3)$$

O factor de conversão de energia,  $FC$ , e o poder calorífico inferior do combustível,  $PCI$ , são constantes que dependem do tipo de combustível utilizado.

A capacidade do bloco,  $CapBloco$ , é determinada em função da capacidade máxima da  $GenUnit$ ,  $capMax$ , e do número de blocos desejados,  $nblocos$  (pré-definido no simulador

proposto com 10 e com a garantia que o primeiro bloco satisfaz a capacidade mínima).

$$CapBloco = \frac{capMax}{nblocos} \quad (4.4)$$

O custo de CO<sub>2</sub>,  $custoCO_2$ , é obtido através de,

$$custoCO_2 = prCo_2 \times \frac{eComb \times FC}{PCI \times \eta} \quad (4.5)$$

onde  $prCo_2$  é o preço de CO<sub>2</sub> e  $eComb$  a emissão de CO<sub>2</sub> do combustível.

A interface gráfica da *GenUnit* é apresentada na figura 4.2.

FIGURA 4.2: Interface gráfica da Unidade produtora.

#### 4.1.2 Empresas produtoras

As empresas produtoras, ou "generating companies" (*GenCos*), têm como função licitar toda a energia das suas unidades produtoras ( $GenUnits_{GenCo}$ ), no mercado *Pool* gerido pelo operador de mercado (cf. secção 4.1.4) de modo a maximizar o lucro da empresa. Cada *GenCo* terá ao seu dispor a lista das  $GenUnits_{GenCo}$  que possui e informação específica sobre cada  $GenUnit_{GenCo}$  (e.g. tecnologia, capacidade máxima, tempo de

arranque, tempo de paragem) de modo a poder escolher qual a melhor estratégia aplicar, individualmente, às suas *GenUnits<sub>GenCo</sub>*.

Considera-se dois tipos de estratégias, as de ajuste fixo e as de ajuste variável. As estratégias de ajuste fixo,  $fettg_i$  onde  $i \in \{1, \dots, 11\}$ , que a *GenCo* pode aplicar são:

- i.  $fettg_1$ , "MarginalCost", licita de acordo com o custo marginal da *GenUnit<sub>GenCo</sub>*;
- ii.  $fettg_2$ , "Up", faz um pequeno incremento no preço de todos os blocos licitados no dia anterior;
- iii.  $fettg_3$ , "BigUp", similar ao item [ii](#), mas faz um incremento maior;
- iv.  $fettg_4$ , "Down", faz um pequeno decremento no preço de todos os blocos licitados no dia anterior;
- v.  $fettg_5$ , "BigDown", similar ao item [iv](#), mas faz um decremento maior;
- vi.  $fettg_6$ , "Hold", mantém o preço de todos os blocos licitados no dia anterior;
- vii.  $fettg_7$ , "FixedUp", faz um pequeno incremento no custo marginal de produção, em todos os blocos;
- viii.  $fettg_8$ , "FixedBigUp", similar ao item [vii](#), mas faz um incremento maior;
- ix.  $fettg_9$ , "FixedDown", faz um pequeno decremento no custo marginal de produção, em todos os blocos;
- x.  $fettg_{10}$ , "FixedBigDown", similar ao item [ix](#), mas faz um decremento maior;
- xi.  $fettg_{11}$ , "AllZero", licita toda a energia a preço zero;

As estratégias de ajuste variável,  $vettg_i$  onde  $i \in \{1, 2\}$ , que a *GenCo* pode aplicar são:

- i.  $vettg_1$ , "FIPP" (do inglês "Fixed Increment Price Proibing"), aumenta uma percentagem do preço nos blocos que foram transaccionados no dia anterior, e diminui essa mesma percentagem, nos blocos que não foram transaccionados. Estabelecendo-se um preço mínimo até ao qual se pode diminuir os preços;

- ii. *vettg<sub>2</sub>*, "PWSR" (do inglês "Physical Withholding based on System Reserve"), utiliza previsões para o dia seguinte da carga e capacidade do sistema de modo a determinar a sua reserva. Quando a reserva do sistema está abaixo de um certo limiar, a *GenCo* tenta-a reduzir ainda mais, retirando capacidade aos blocos da *GenUnit<sub>GenCo</sub>* até atingir a percentagem de redução pretendida. A redução de capacidade da *GenUnit<sub>GenCo</sub>* também só pode ser feita até atingir a percentagem de redução máxima indicada. Toda a capacidade retirada nos diversos blocos é colocada ao preço máximo de mercado.

As ofertas de licitação de uma *GenUnit<sub>GenCo</sub>* podem ser obtidas de 3 formas: i) através das estratégias anteriormente indicadas, ii) directamente a partir de ofertas de licitação previamente construídas (útil quando se tem ao dispor as ofertas de uma *GenCo* contra a qual se pretende jogar) e iii) utilizando aprendizagem, cujo modo de funcionamento é detalhado na secção 4.3.

A prioridade, por ordem crescente, das 3 formas de uma *GenCo* licitar energia é:

- i. aprendizagem;
- ii. dados previamente construídos, e;
- iii. indicação explícita das estratégias.

De salientar, que aos resultados de mercado que advêm das ofertas submetidas ao operador de mercado, é feito ainda um processamento adicional para obter algumas informações importantes para a empresa produtora, como por exemplo, os seus lucros.

O aspecto gráfico da empresa produtora é apresentado na figura 4.3.

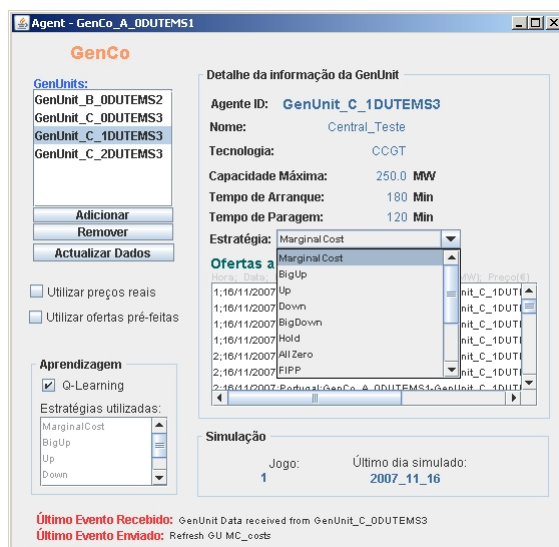


FIGURA 4.3: Interface gráfica da Empresa produtora.

A figura 4.3 inclui uma opção que não foi referida. A opção *Utilizar preços reais*. Esta opção permite indicar se as ofertas de venda a custo marginal pedidas pela *GenCo* e enviadas pelas *GenUnits* *GenCo*, têm em conta os preços reais de combustível ou se são utilizados os preços de referência.

### 4.1.3 Comprador

No lado da procura do mercado existe um único comprador, ou "demand company" (*DemCo*), representando todos os distribuidores, comercializadores, e consumidores qualificados. Uma vez que o mercado *Pool* utilizado é um leilão de venda (onde a procura é fixa), a *DemCo* submete ao operador de mercado apenas a quantidade horária de energia que necessita para satisfazer o consumo, não indicando qualquer preço.

As ofertas submetidas ao operador de mercado podem ser obtidas de duas formas, i) através de dados previamente construídos que não necessitam de qualquer processamento posterior, tal como acontece com as empresas produtoras, ou ii) através da alteração do referencial de uma curva semanal típica de contratação. A curva utilizada, *C*, foi extraída da OMEL <sup>1</sup> entre o dia 7 e o dia 13 do mês de Abril de 2008 e pode ser alterada através da fórmula 4.6 e dos valores máximos, *VMax*, e mínimos, *VMin*, indicados pelo utilizador para cada dia da semana. Conforme a opção, a mudança de referencial pode ser feita

<sup>1</sup> <http://www.omel.es/>

num contexto diário ou num contexto semanal.

$$f(c) = \frac{(c - \min C) \times (VMax - VMin)}{\max C - \min C} + VMin, \forall c \in C \quad (4.6)$$

De notar que caso o máximo indicado pelo utilizador,  $VMax$ , seja igual ao mínimo,  $VMin$ , tem-se uma procura diária constante.

A interface gráfica da *DemCo* é apresentada na figura 4.4.

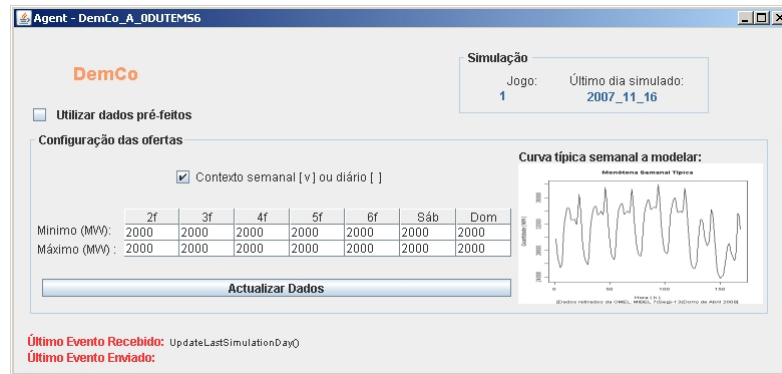


FIGURA 4.4: Interface gráfica do Comprador.

#### 4.1.4 Operador de mercado

O operador de mercado tem como função realizar o modelo *Pool* (cf. secção 3.1.1) num contexto de leilão de venda do dia seguinte (i.e. no dia liquida-se a energia para todas as horas do dia seguinte), permitindo várias ofertas horárias simples (cf. secção 3.3.1) por parte dos vendedores e apenas uma oferta horária de quantidade de energia por parte do comprador. Sendo que este último caso representa todo o consumo do sistema eléctrico.

Para realizar a *Pool* o operador de mercado deve pedir as ofertas de licitação aos agentes autorizados a ir a mercado, aguardar que todos os agentes respondam ao pedido feito, e posteriormente, informar os agentes participantes dos resultados obtidos. Os resultados enviados aos agentes contêm informação pública, comum a todos os agentes, e informação privada, que diz respeito somente ao agente destinatário. Na informação pública consta:

- dados horários, como a quantidade de energia transaccionada, o preço de fecho do mercado, a capacidade do sistema, a percentagem de reserva do sistema, as ofertas de energia ofertadas e transaccionadas, sem indicação das empresas produtoras, e;

- dados diários, como a quantidade de energia transaccionada, a média desta, a média dos preços de fecho do mercado e a média da percentagem de reserva do sistema.

Na informação privada encontram-se também:

- dados horários, referentes à *GenCo* destinatária, como a capacidade licitada e transaccionada, a receita obtida, a receita total das outras *GenCos*, a percentagem de quota de mercado, a percentagem de quota de mercado não transaccionada, e ainda;
- dados diários, como a soma das receitas, a soma total da receita das outras *GenCos*, a média da capacidade transaccionada, a média da percentagem da quota de mercado e a média da percentagem de quota de mercado não transaccionada.

Uma vez que é o operador de mercado que controla o *motor* do mercado eléctrico (a *Pool*), é ele também que controla o período de simulação do mercado e o número de repetições desse período.

A interface gráfica do operador de mercado é apresentada na figura 4.5.



FIGURA 4.5: Interface gráfica do Operador de mercado.

## 4.2 Mercado Eléctrico Multi-Agente

Esta secção apresenta a modelação do sistema multi-agente (SMA) do mercado eléctrico proposto na secção anterior. Nesta modelação as várias entidades do mercado são representadas como agentes híbridos (empresas produtoras) e agentes reactivos (unidades de produção, comprador e operador de mercado).

Das várias plataformas existentes (e.g. OAA e Repast ), elegeu-se a plataforma INGENIAS para construir o SMA pretendido. A razão desta escolha está relacionada com as características do INGENIAS, nomeadamente com a metodologia utilizada, e com as características pretendidas para o SMA e que o INGENIAS suporta, com relevo para o suporte ao funcionamento num âmbito distribuído, e de ser garantida interoperabilidade com outros agentes. Outro facto que teve influência na escolha, foi a disponibilidade mostrada pelo grupo responsável pelo INGENIAS, o grupo de investigação *Grasia* <sup>2</sup>.

O resultado do mapeamento do mercado eléctrico proposto para um SMA, é o mercado eléctrico multi-agente da figura 4.6.

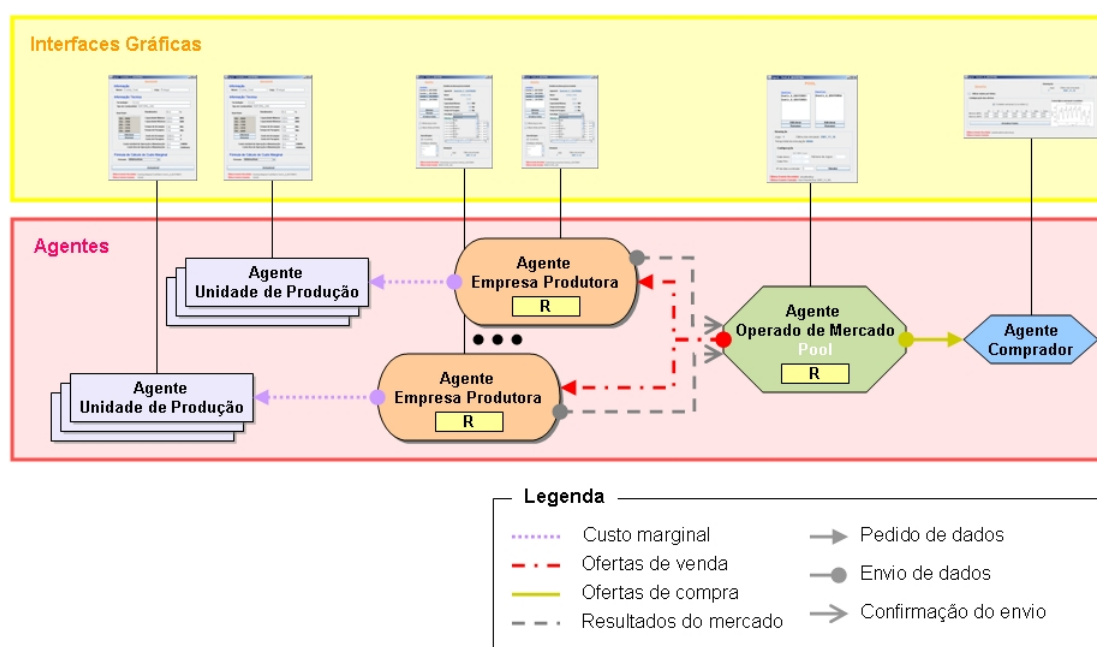


FIGURA 4.6: Mercado Eléctrico Multi-Agente.

<sup>2</sup> <http://grasia.fdi.ucm.es>

Para auxiliar o agente operador de mercado e os agentes empresas produtoras no cálculo numérico matricial utilizou-se o "R Project"<sup>3</sup> (cf. figura 4.6), visto a linguagem Java não ser vocacionada para tal.

As próximas subsecções detalham o SMA do mercado eléctrico nas suas várias vistas. Na subsecção referente à modelação das entidades do mercado eléctrico (i.e. unidades produtoras, empresas produtoras, comprador e operador de mercado) descrevem-se os modelos de agente e os modelos de tarefas e objectivos que não estão relacionados com as interacções. Na subsecção referente às interacções do SMA descrevem-se os modelos de interacção e os modelos de tarefas e objectivos. Por último, na secção 4.2.3, explica-se como configurar cenários no SMA.

**Ligação do agente ao "R Project".** Para um agente utilizar o "R Project", é necessário iniciar primeiro a instância R que o irá auxiliar.

```
> library(Rserve)
> Rserve(port=6311)
Starting Rserve...
D:/R/R-2.7.1/library/Rserve/Rserve.exe>
```

FIGURA 4.7: Comandos para iniciar uma instância R no "R Project".

No caso da figura 4.7, a instância criada fica à escuta de pedidos no porto 6311. Tipicamente, são criadas várias instâncias do R (2 para as *GenCos* e 1 para a *Pool*), a correr em diferentes portos.

Para gerir a associação das instâncias R aos diversos agentes criou-se uma classe Java de gestão. Esta classe, permite que um agente obtenha a sua instância R indicando o seu nome. Parte do código dessa classe é indicado de seguida.

```
static private HashMap<String, RConnection> RConnections = new HashMap<String, RConnection>();
static private int lastPort = 6311; // o porto por omissao do Rserve é o 6311

static public RConnection getRConnection(String agentID) throws RserveException{
    synchronized (o) {
        if(RConnections.get(agentID)==null||!RConnections.get(agentID).isConnected()){
            RConnections.put(agentID, new RConnection("localhost",lastPort));
            lastPort++;
        }
        return RConnections.get(agentID);
    }
}
```

FIGURA 4.8: Código parcial da classe Java de gestão de instâncias R.

<sup>3</sup> <http://www.r-project.org/>

A interacção dos agentes com as instâncias R é feita através de classes Java (e.g. `RConnection`), fornecidas pelo "R Project". Assim, para um agente executar as acções pretendidas na instância R, é necessário obter a instância R que lhe corresponde e utilizar as classes e os métodos disponibilizados. No simulador proposto, utiliza-se "scripts" R pré-feitos que são invocados através do método `eval` da classe `RConnection`. O resultado do processamento desses "scripts" acaba, normalmente, na escritas de dados em ficheiro.

### 4.2.1 Modelação das entidades do mercado

Os agentes criados no INGENIAS para representar as diversas entidades do mercado eléctrico (i.e. as unidades produtoras, as empresas produtoras, o comprador e o operador de mercado) podem ser vistos de duas perspectivas diferentes, através do modelo de agente e através do modelo de tarefas e objectivos.

**Perspectiva do agente.** Uma entidade do mercado é modelada na perspectiva do agente, tipicamente, como mostrado na figura 4.9.

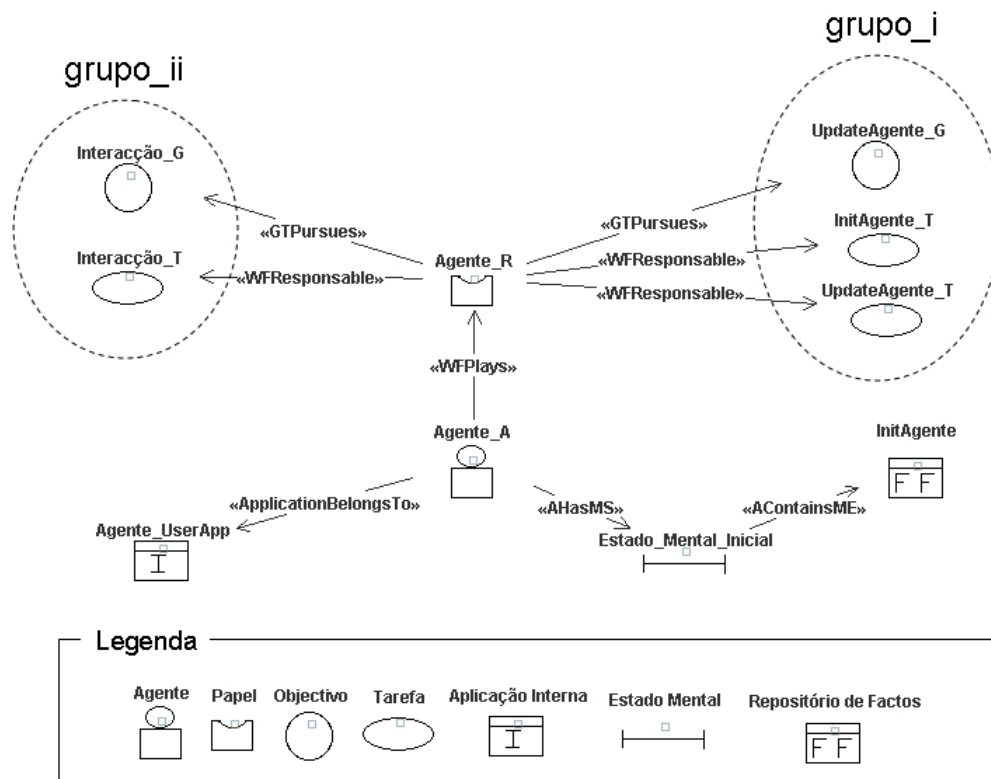


FIGURA 4.9: Modelo de agente típico.

A entidade *Agente\_A* é um agente que desempenha (relação *WFPlays*) o papel (“role”) de um *Agente\_R*, assimilando as suas tarefas e os seus objectivos. As tarefas e os objectivos estão relacionados (numa perspectiva de tarefas e objectivos) e separam-se em dois grupos, *grupo\_i*) o grupo relativo ao agente isolado e *grupo\_ii*) o grupo relacionado com as interacções entre o agente e as outras entidades do sistema. No *grupo\_i* está presente o objectivo e as tarefas típicas (e individuais) que todos os agentes do mercado eléctrico têm. No *grupo\_ii* tem-se por cada interacção existente um objectivo e uma ou várias tarefas associadas à interacção. A descrição das tarefas e dos objectivos do modelo de agente da figura 4.9 é detalhado na tabela 4.2.

Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>grupo_i</b>		
<b>UpdateAgente_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Manter o estado mental e a interface gráfica actualizados</b>
InitAgente_T	Tarefa	Cria e actualiza a interface gráfica
UpdateAgente_T	Tarefa	Actualiza o estado mental do agente quando a informação presente na sua interface gráfica é alterada pelo utilizador
<b>grupo_ii</b>		
<b>Interacção_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Objectivo que se pretende atingir com a interacção (este objectivo é partilhado por todos os seus participantes)</b>
Interacção_T	Tarefa	Tarefa executada pelo agente no contexto da interacção

TABELA 4.2: Tarefas e objectivos do agente *Agente\_A*.

Para além das tarefas e dos objectivos, o agente *Agente\_A* adiciona ao seu estado mental também o repositório de factos *InitAgente*. Este repositório de factos servirá para ser consumido, de modo a despoletar a tarefa *InitAgente\_T*, como veremos mais à frente no modelo de tarefas e objectivos.

No INGENIAS, a integração de “software” externo (não orientado a agentes) é feita por meio de aplicações, que podem ser externas, caso já existam antes da criação do sistema, ou internas, caso sejam criadas durante o tempo de vida do agente. No caso apresentado na figura 4.9 o agente *Agente\_A* possui (relação *ApplicationBelongsTo*) a aplicação interna *Agente\_UserApp*, que está associada ao ficheiro Java da sua interface gráfica. Esta ligação é feita num diagrama de componentes associando um *INGENIASComponent* à aplicação, como mostra a figura 4.10.



FIGURA 4.10: Diagrama de componentes da aplicação interna *Agente\_UserApp*.

**Perspectiva das tarefas e objectivos.** A relação entre as tarefas e os objectivos do agente *Agente\_A* é vista de outra perspectiva, através do modelo de tarefas e objectivos. Das tarefas e objectivos presentes na tabela 4.2 apenas os pertencentes ao grupo *\_i* serão apresentados. Os do grupo *\_ii* serão introduzidos no modelo de tarefas e objectivos da secção referente às interações do SMA (cf. secção 4.2.2). A figura 4.11 mostra o modelo típico do grupo *\_i*.

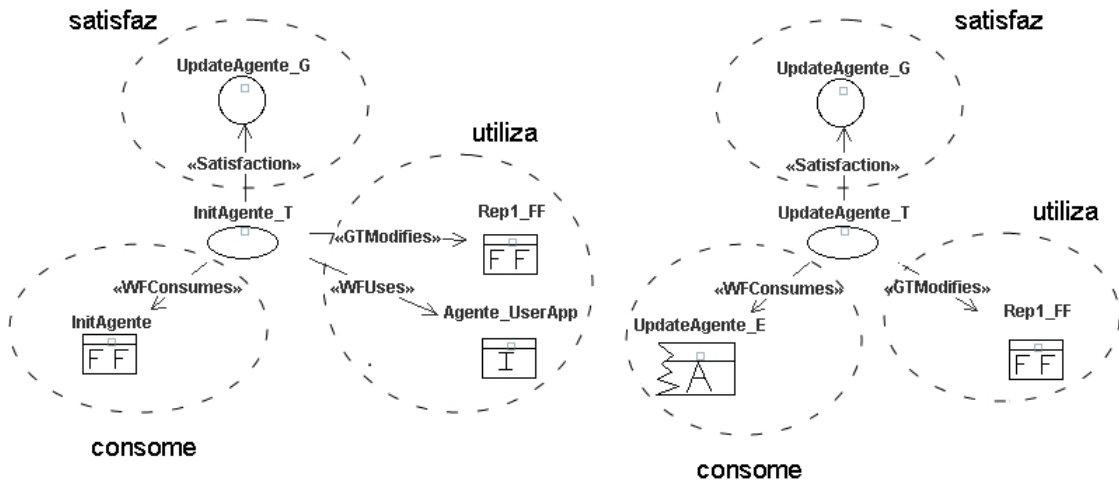


FIGURA 4.11: Modelo de tarefas e objectivos típico.

Uma tarefa, normalmente, **satisfaz** um objectivo, **consome** as componentes que fazem despoletar (e.g. repositórios de factos e eventos da aplicação), **utiliza** e/ou altera componentes já existentes durante o processamento da tarefa (e.g. repositórios de factos e aplicações internas) e **cria** componentes (e.g. interações e repositórios de factos).

Na figura 4.11 as tarefas *InitAgente\_T* e *UpdateAgente\_T* procuram satisfazer (relação *Satisfaction*) o objectivo *UpdateAgente\_G* e são descritas através da tabela 4.3 e 4.4, respectivamente.

Tarefa <i>InitAgente_T</i>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<i>InitAgente</i>	Repositório de factos	Não contém qualquer facto, serve somente para despoletar a tarefa
<b>Utiliza</b>		
<i>Agente_UserApp</i>	Aplicação Interna	Utiliza a aplicação interna para criar e actualizar a interface gráfica
<i>Rep1_FF</i>	Repositório de factos	A actualização da interface gráfica é feita com a informação obtida neste repositório
<b>Cria</b>		
---	---	---

TABELA 4.3: Descrição da tarefa *InitAgente\_T*.

Tarefa UpdateAgente_T		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
UpdateAgente_E	Evento da aplicação	As alterações na interface gráfica são percebidas e indicadas por este evento
<b>Utiliza</b>		
Rep1_FF	Repositório de factos	Após receber a informação alterada na interface gráfica actualiza os factos deste repositório
<b>Cria</b>		
---	---	---

TABELA 4.4: Descrição da tarefa UpdateAgente\_T.

Nas tarefas apresentadas não existe nenhuma que crie componentes. Existe contudo, nos agentes criados para o mercado eléctrico situações onde a tarefa cria componentes. As componentes criadas estão exemplificadas na figura 4.12.

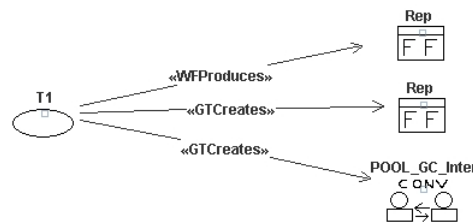


FIGURA 4.12: Componentes criadas pelas tarefas.

A diferença entre criar (relação GTCreates) e produzir (relação WFProduces), é que criar constrói uma componente nova, enquanto que produzir utiliza componentes já existentes para as popular de modo a serem consumidas por outros. A componente chamada POOL\_GC\_Inter é uma entidade de conversação que tem associado uma interacção chamada POOL\_GC\_Inter.

Apesar de uma tarefa, no modelo de tarefas e objectivos, estar relacionada com outras componentes, é necessário codificá-la de modo a realizar as acções pretendidas. A codificação da tarefa é feita num INGENIASCodeComponent que se associa à tarefa em questão, num diagrama de componentes, como mostrado na figura 4.13.

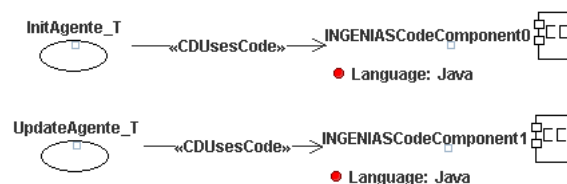


FIGURA 4.13: Diagrama de componentes das tarefas InitAgente\_T e UpdateAgente\_T.

Como exemplo, temos um possível troço de código do `INGENIASCodeComponent` que está associado à tarefa `InitAgente_T`.

```
1: String agentId = eiRep1_FF.getAgentID();
2: eaAgente_UserApp.showGUI(agentId);
3: eaAgente_UserApp.showInformation(eiRep1_FF.getInfo1());
```

**Reutilização de componentes.** Todo o processo de construção de um agente e das suas componentes, até aqui detalhado, serviu para construir um único agente, o agente `Agente_A`, contudo, as componentes construídas podem ser reutilizadas em novos agentes (e.g. agente `Agente_B` e agente `Agente_C`), bastando relacionar o novo agente com as componentes já construídas, como se mostra na figura 4.14.

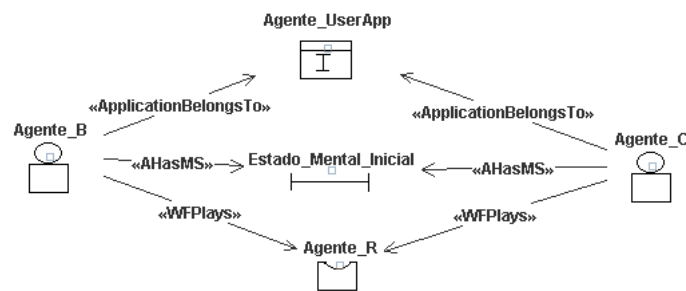


FIGURA 4.14: Modelo de agente do agente `Agente_B` e `Agente_C`.

Nas próximas subsecções são apresentados os modelos de agentes e os modelos de tarefas e objectivos das diversas entidades do mercado eléctrico.

#### 4.2.1.1 Unidades de produção

**Perspectiva do agente.** Na figura 4.15 um agente *GenUnit* intitulado `GenUnit_A`, incorpora os objectivos e as tarefas do papel `GenUnit_R`.

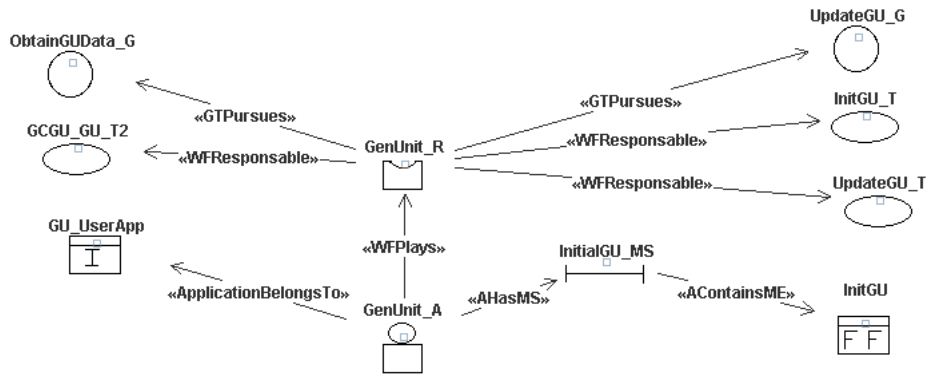


FIGURA 4.15: Modelo de agente da unidade de produção GenUnit\_A.

A descrição das tarefas e dos objectivos do modelo de agente da figura 4.15 é apresentada na tabela 4.5.

Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>grupo_i</b>		
UpdateGU_G	Objectivo	Manter o estado mental e a interface gráfica actualizados
InitGU_T	Tarefa	Cria e actualiza a interface gráfica
UpdateGU_T	Tarefa	Actualiza o estado mental do agente quando a informação presente na sua interface gráfica é alterada pelo utilizador
<b>grupo_ii</b>		
ObtainGUData_G	Objectivo	Colaborar com a GenCo na obtenção das ofertas a custo marginal
GCGU_GU_T2	Tarefa	Responde aos pedidos da GenCo enviando os custos marginais

TABELA 4.5: Tarefas e objectivos do agente GenUnit\_A.

**Perspectiva das tarefas e objectivos.** As tarefas e os objectivos não relacionados com interações (grupo\_i) são apresentados no modelo da figura 4.16.

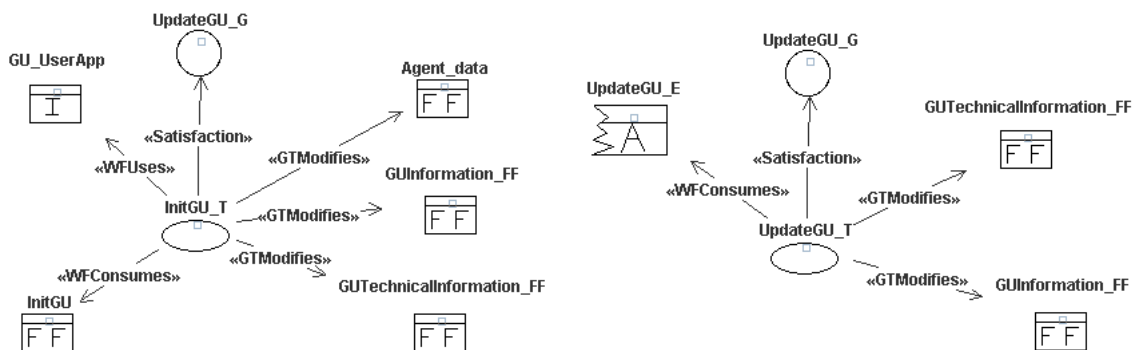


FIGURA 4.16: Modelo de tarefas e objectivos da GenUnit.

Tanto a tarefa `InitGU_T` como a tarefa `UpdateGU_T` procuram satisfazer o objectivo `UpdateGU_G`. Estas tarefas são descritas na tabela 4.6 e 4.7, respectivamente.

Tarefa <code>InitGU_T</code>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<code>InitGU</code>	Repositório de factos	Não contém qualquer facto, serve só para despolar a tarefa
<b>Utiliza</b>		
<code>Agente_UserApp</code>	Aplicação Interna	Utiliza os seus métodos para criar e actualizar a interface gráfica
<code>GUInformation_FF</code>	Repositório de factos	Contém o nome e o país da <code>GenUnit</code> . Essa informação é utilizada para actualizar a interface gráfica
<code>GUTechnicalInformation_FF</code>	Repositório de factos	Contém informação mais técnica da <code>GenUnit</code> (e.g. capacidade máxima, tecnologia). Essa informação é utilizada para actualizar a interface gráfica
<code>Agent_data</code>	Repositório de factos	Contém informação interna do agente (e.g. nome do agente). Essa informação é utilizada para actualizar a interface gráfica
<b>Cria</b>		
---	---	---

TABELA 4.6: Descrição da tarefa `InitGU_T`.

Tarefa <code>UpdateGU_T</code>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<code>UpdateGU_E</code>	Evento da aplicação	Percepciona as alterações feitas na sua interface gráfica
<b>Utiliza</b>		
<code>GUInformation_FF</code>	Repositório de factos	Actualiza o repositório
<code>GUTechnicalInformation_FF</code>	Repositório de factos	Actualiza o repositório
<b>Cria</b>		
---	---	---

TABELA 4.7: Descrição da tarefa `UpdateGU_T`.

#### 4.2.1.2 Empresas produtoras

**Perspectiva do agente.** Na figura 4.17 um agente `GenCo`, intitulado `GenCo_A`, incorpora os objectivos e as tarefas do papel `GenCo_R`.

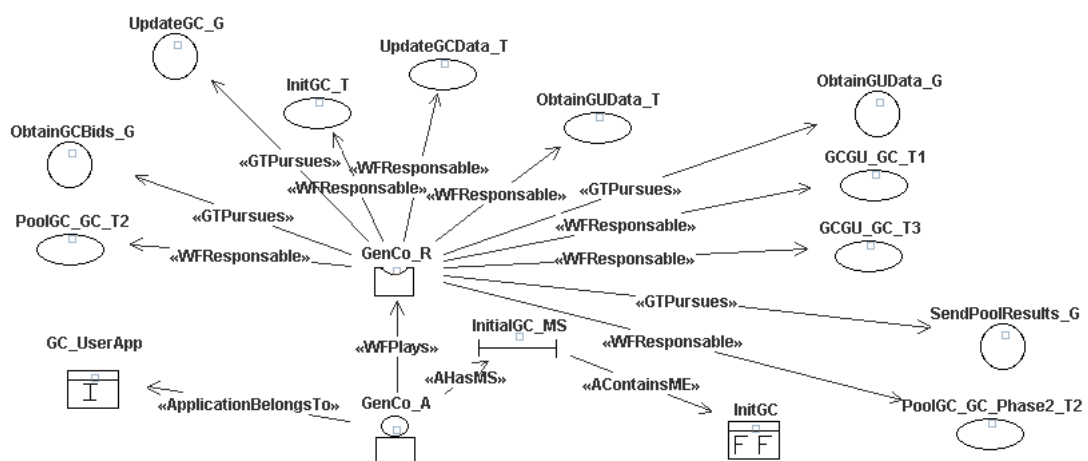


FIGURA 4.17: Modelo de agente da empresa de produção `GenCo_A`.

A descrição das tarefas e dos objectivos do modelo de agente da figura 4.17 é apresentada na tabela 4.8.

Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>grupo_i</b>		
<b>UpdateGC_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Manter o estado mental e a interface gráfica actualizados</b>
InitGC_T	Tarefa	Cria e actualiza a interface gráfica
UpdateGCData_T	Tarefa	Actualiza o estado mental do agente quando a informação presente na sua interface gráfica é alterada pelo utilizador
ObtainGUData_T	Tarefa	Inicia a conversação com as GenUnits <sub>GenCo</sub> para obter as ofertas a custo marginal
<b>grupo_ii</b>		
<b>ObtainGUData_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Obter as ofertas a custo marginal das GenUnits<sub>GenCo</sub></b>
GCGU_GC_T1	Tarefa	Pede os custos marginais
GCGU_GC_T3	Tarefa	Recebe os custos marginais
<b>ObtainGCBids_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Enviar as ofertas de licitação quando solicitado pela Pool</b>
POOLGC_GC_T2	Tarefa	Responde aos pedidos da Pool, obtendo as ofertas de venda (com ajuda do "R Project") e enviando-as à Pool
<b>SendPoolResults_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Receber os resultados do mercado enviados pela Pool</b>
POOLGC_GC_Phase2_T2	Tarefa	Recebe os resultados do mercado e processa-os (com a ajuda do "R Project")

TABELA 4.8: Tarefas e objectivos do agente GenCo\_A.

**Perspectiva das tarefas e objectivos.** As tarefas e os objectivos do grupo\_i são apresentados no modelo da figura 4.18.

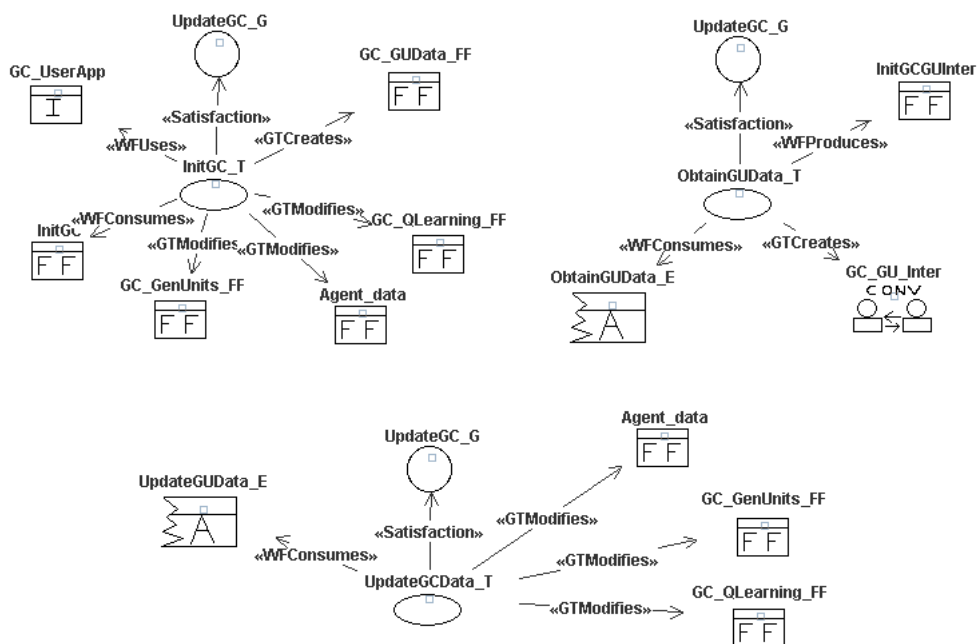


FIGURA 4.18: Modelo de tarefas e objectivos da GenCo.

As tarefas `InitGC_T`, `UpdateGCData_T`, e `ObtainGUData_T` procuram satisfazer o objectivo `UpdateGC_G`. Estas tarefas são descritas na tabela 4.9, 4.10 e 4.11, respectivamente.

Tarefa <code>InitGC_T</code>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<code>InitGC</code>	Repositório de factos	Não contém qualquer facto, serve só para despolar a tarefa
<b>Utiliza</b>		
<code>GC_UserApp</code>	Aplicação Interna	Utiliza os seus métodos para criar e actualizar a interface gráfica
<code>GC_GenUnits_FF</code>	Repositório de factos	Contém a informação principal de uma <code>GenCo</code> (e.g. <code>GenUnits</code> que possui e as suas estratégias). Essa informação é utilizada para actualizar a interface gráfica
<code>GC_QLearning_FF</code>	Repositório de factos	Contém informação relativa à aprendizagem por reforço. Essa informação é utilizada para actualizar a interface gráfica
<code>Agent_data</code>	Repositório de factos	Contém informação interna do agente (e.g. nome do agente). Essa informação é utilizada para actualizar a interface gráfica
<b>Cria</b>		
<code>GC_GUData_FF</code>	Repositório de factos	Cria o repositório onde será armazenada a informação das suas <code>GenUnits</code>

TABELA 4.9: Descrição da tarefa `InitGC_T`.

Tarefa <code>UpdateGCData_T</code>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<code>UpdateGUData_E</code>	Evento da aplicação	Percepciona as alterações feitas na sua interface gráfica
<b>Utiliza</b>		
<code>GC_GenUnits_FF</code>	Repositório de factos	Actualiza o repositório
<code>GC_QLearning_FF</code>	Repositório de factos	Actualiza o repositório
<code>Agent_data</code>	Repositório de factos	Utiliza somente a sua informação
<b>Cria</b>		
---	---	---

TABELA 4.10: Descrição da tarefa `UpdateGCData_T`.

Tarefa <code>ObtainGUData_T</code>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<code>ObtainGUData_E</code>	Evento da aplicação	Percepciona pedidos para obtenção dos custos marginais das <code>GenUnits</code>
<b>Utiliza</b>		
---	---	---
<b>Cria</b>		
<code>GC_GU_Inter</code>	Conversação	Cria a conversação com as <code>GenUnits</code>
<code>InitGCGUInter</code>	Repositório de factos	Passa informação à interacção

TABELA 4.11: Descrição da tarefa `ObtainGUData_T`.

A interacção `GC_GU_Inter` associada à entidade de conversação é pormenorizada na secção 4.2.2.

#### 4.2.1.3 Comprador

**Perspectiva do agente.** Na figura 4.19 o agente *DemCo*, intitulado `DemCo_A`, incorpora os objectivos e as tarefas do papel `DemCo_R`.

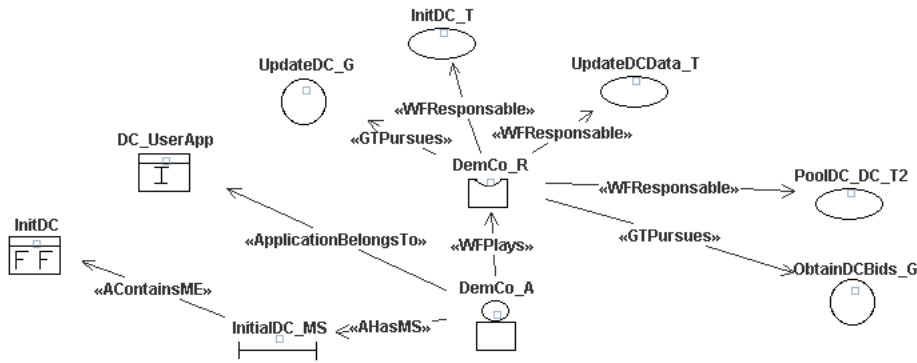


FIGURA 4.19: Modelo de agente do comprador DemCo\_A.

A descrição das tarefas e dos objetivos do modelo de agente da figura 4.15 é apresentada na tabela 4.12.

Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>grupo_i</b>		
UpdateDC_G	Objetivo	Manter o estado mental e a interface gráfica actualizados
InitDC_T	Tarefa	Cria e actualiza a interface gráfica
UpdateDCData_T	Tarefa	Actualiza o estado mental do agente quando a informação presente na sua interface gráfica é alterada pelo utilizador
<b>grupo_ii</b>		
ObtainDCBids_G	Objetivo	Enviar as ofertas de compra de energia quando solicitado pela Pool
PoolDC_DC_T2	Tarefa	Responde aos pedidos de envio das ofertas da Pool

TABELA 4.12: Tarefas e objetivos do agente DemCo\_A.

**Perspectiva das tarefas e objetivos.** As tarefas e os objetivos do grupo\_i são apresentados no modelo da figura 4.20.

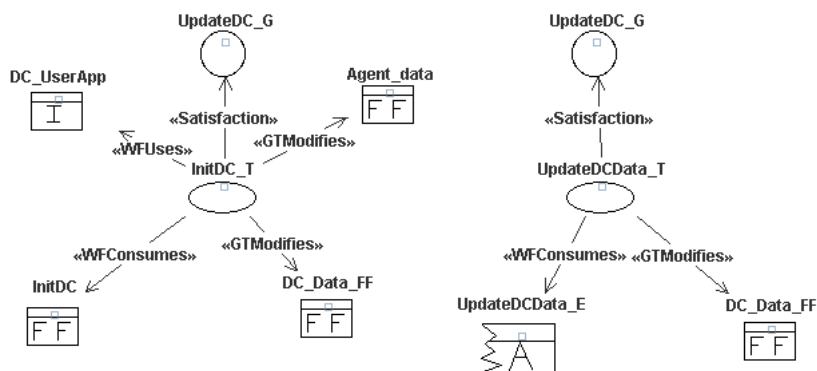


FIGURA 4.20: Modelo de tarefas e objetivos da DemCo.

Tanto a tarefa `InitDC_T` como a tarefa `UpdateDCData_T` procuram satisfazer o objectivo `UpdateDC_G`. Estas tarefas são descritas na tabela 4.13 e 4.14, respectivamente.

Tarefa <code>InitDC_T</code>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<code>InitDC</code>	Repositório de factos	Não contém qualquer facto, serve só para despolar a tarefa
<b>Utiliza</b>		
<code>DC_UserApp</code>	Aplicação Interna	Utiliza os seus métodos para criar e actualizar a interface gráfica
<code>DC_Data_FF</code>	Repositório de factos	Contém os valores mínimos e máximos diários para ajustar a curva semanal, a indicação se é para mudar o referencial num contexto semanal ou diário e a indicação se são utilizados os dados pré-feitos. Essa informação é utilizada para actualizar a interface gráfica
<code>Agent_data</code>	Repositório de factos	Contém informação interna do agente (e.g. nome do agente). Essa informação é utilizada para actualizar a interface gráfica
<b>Cria</b>		
---	---	---

TABELA 4.13: Descrição da tarefa `InitDC_T`.

Tarefa <code>UpdateDCData_T</code>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<code>UpdateDCData_E</code>	Evento da aplicação	Percepção das alterações feitas na sua interface gráfica
<b>Utiliza</b>		
<code>DC_Data_FF</code>	Repositório de factos	Actualiza o repositório
<b>Cria</b>		
---	---	---

TABELA 4.14: Descrição da tarefa `UpdateDCData_T`.

Todas as interacções utilizadas nas tabelas anteriores são pormenorizadas na secção 4.2.2.

#### 4.2.1.4 Operador de mercado

**Perspectiva do agente.** Na figura 4.21 o agente *Pool*, intitulado `Pool_A`, incorpora os objectivos e as tarefas do papel `Pool_R`.

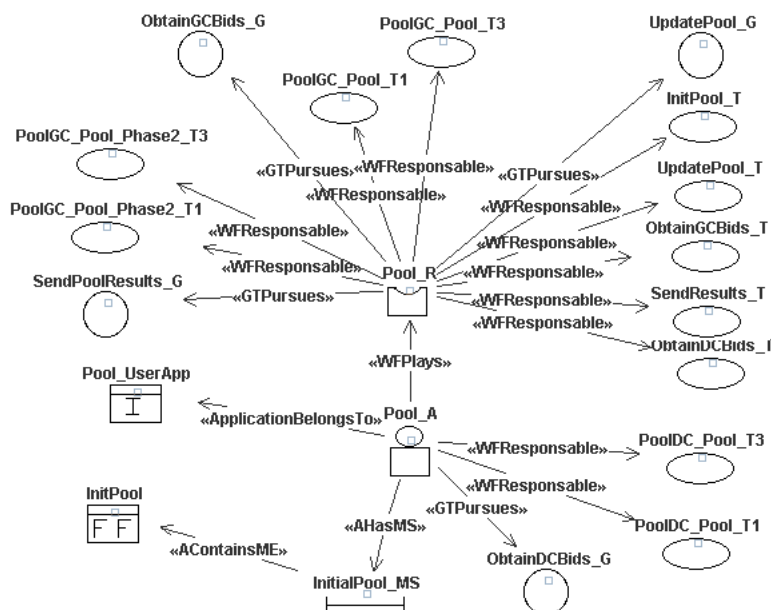


FIGURA 4.21: Modelo de agente do operador de mercado Pool\_A.

A descrição das tarefas e dos objectivos do modelo de agente da figura 4.21 é apresentada na tabela 4.15.

Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>grupo_i</b>		
<b>UpdatePool_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Manter o estado mental e a interface gráfica actualizados</b>
InitPool_T	Tarefa	Cria e actualiza a interface gráfica
UpdatePool_T	Tarefa	Actualiza o estado mental do agente quando a informação presente na sua interface gráfica é alterada pelo utilizador
ObtainGCBids_T	Tarefa	Inicia a conversação com as GenCos para obter as ofertas de venda
ObtainDCBids_T	Tarefa	Inicia a conversação com a DemCo para obter as ofertas de compra
SendResults_T	Tarefa	Inicia a conversação com as GenCos para enviar resultados
<b>grupo_ii</b>		
<b>ObtainGCBids_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Obter as ofertas de venda das GenCos</b>
PoolGC_Pool_T1	Tarefa	Pede as ofertas de venda
PoolGC_Pool_T3	Tarefa	Recebe as ofertas de venda e realiza, caso tenha todas as respostas, o mercado Pool com a ajuda do "R Project"
<b>ObtainDCBids_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Obter as ofertas de compra da DemCo</b>
PoolDC_Pool_T1	Tarefa	Pede as ofertas de compra
PoolDC_Pool_T3	Tarefa	Recebe as ofertas de compra e realiza, caso tenha todas as respostas, o mercado Pool com a ajuda do "R Project"
<b>SendPoolResults_G</b>	<b>Objectivo</b>	<b>Enviar os resultados do mercado às GenCos</b>
PoolGC_Pool_Phase2_T1	Tarefa	Envia os resultados do mercado
PoolGC_Pool_Phase2_T3	Tarefa	Recebe a confirmação do envio

TABELA 4.15: Tarefas e objectivos do agente Pool\_A.

**Perspectiva das tarefas e objectivos.** As tarefas e os objectivos do grupo\_i são apresentados no modelo da figura 4.22.

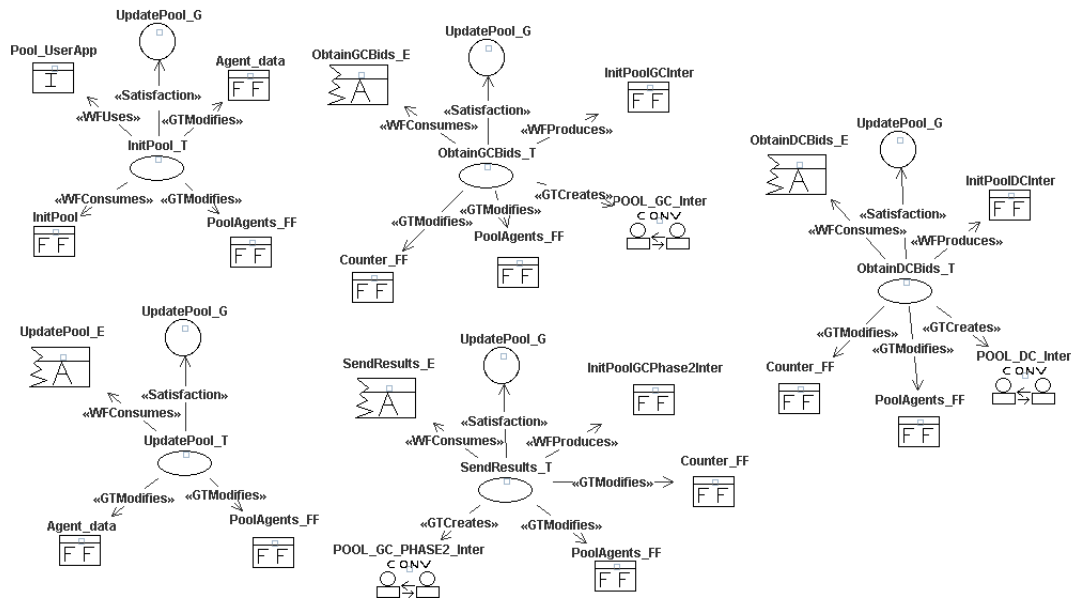


FIGURA 4.22: Modelo de tarefas e objectivos da Pool.

As tarefas `InitPool_T`, `UpdatePool_T`, `ObtainGCBids_T`, `ObtainDCBids_T` e `SendResults_T` procuram satisfazer o objectivo `UpdatePool_G`. Estas tarefas são descritas na tabela 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20, respectivamente.

Tarefa <code>InitPool_T</code>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<code>InitPool</code>	Repositório de factos	Não contém qualquer facto, serve só para despolar a tarefa
<b>Utiliza</b>		
<code>Pool_UserApp</code>	Aplicação Interna	Utiliza os seus métodos para criar e actualizar a interface gráfica
<code>PoolAgents_FF</code>	Repositório de factos	Contém os agentes <code>GenCos</code> e o agente <code>DemCo</code> que licitam em mercado. Essa informação é utilizada para actualizar a
<code>Agent_data</code>	Repositório de factos	Contém informação interna do agente (e.g. nome do agente). Essa informação é utilizada para actualizar a interface gráfica
<b>Cria</b>		
---	---	---

TABELA 4.16: Descrição da tarefa `InitPool_T`.

Tarefa <code>UpdatePool_T</code>		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
<code>UpdatePool_E</code>	Evento da aplicação	Percepciona as alterações feitas na sua interface gráfica
<b>Utiliza</b>		
<code>PoolAgents_FF</code>	Repositório de factos	Actualiza o repositório
<code>Agent_data</code>	Repositório de factos	Utiliza somente a sua informação
<b>Cria</b>		
---	---	---

TABELA 4.17: Descrição da tarefa `UpdatePool_T`.

Tarefa ObtainGCBids_T		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
ObtainGCBids_E	Evento da aplicação	Percepciona pedidos para obtenção das ofertas de venda
<b>Utiliza</b>		
PoolAgents_FF	Repositório de factos	Utilizado para indicar as GenCos presentes na interacção
Counter_FF	Repositório de factos	O número de respostas esperadas é actualizado
<b>Cria</b>		
POOL_GC_Inter	Conversaço	Cria a conversaço com as GenCos
InitPoolGCInter	Repositório de factos	Passa informação à interacção

TABELA 4.18: Descrição da tarefa ObtainGCBids\_T.

Tarefa ObtainDCBids_T		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
ObtainDCBids_E	Evento da aplicação	Percepciona pedidos para obtenção das ofertas de compra
<b>Utiliza</b>		
PoolAgents_FF	Repositório de factos	Utilizado para indicar a DemCo presente na interacção
Counter_FF	Repositório de factos	O número de respostas esperadas é actualizado
<b>Cria</b>		
POOL_DC_Inter	Conversaço	Cria a conversaço com a DemCo
InitPoolDCInter	Repositório de factos	Passa informação à interacção

TABELA 4.19: Descrição da tarefa ObtainDCBids\_T.

Tarefa SendResults_T		
Nome	Tipo INGENIAS	Descrição
<b>Consome</b>		
SendResults_E	Evento da aplicação	Percepciona pedidos para envio de resultados de mercado para as GenCos
<b>Utiliza</b>		
PoolAgents_FF	Repositório de factos	Utilizado para indicar as GenCos presentes na interacção
Counter_FF	Repositório de factos	O número de respostas esperadas é actualizado
<b>Cria</b>		
POOL_GC_PHASE2_Inter	Conversaço	Cria a conversaço com as GenCos
InitPoolGCPhase2Inter	Repositório de factos	Passa informação à interacção

TABELA 4.20: Descrição da tarefa SendResults\_T.

### 4.2.2 Interacções

No INGENIAS, as interacções são definidas através de modelos de interacção, em dois passos. No primeiro defini-se a própria interacção (i.e. quem participa nela, o objectivo atingir, e o protocolo utilizado) e no segundo o protocolo (i.e. a maneira como os participantes interagem).

**Interacção.** A definição típica de uma interacção é mostrada na figura 4.23.

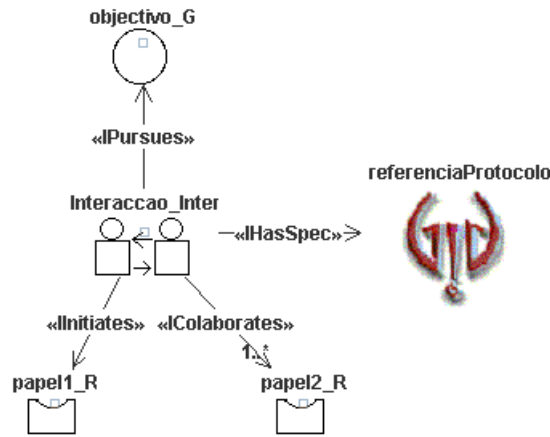


FIGURA 4.23: Definição típica de uma interação.

A definição de uma interação requer a inserção de papéis (“roles”), de uma entidade de interação, de uma referência para a definição do protocolo, e de um objectivo (opcional). Dos papéis presentes só um pode iniciar a interação (relação *IInitiates*) e um ou muitos podem colaborar (relação *IColaborates*). A relação *IColaborates* pode ter adicionalmente uma etiqueta de cardinalidade com 1 ou 1..\* (o mesmo que 1..n); por omissão é 1. Ela indica quantos agentes com o papel do colaborador são incluídos na interação, caso a cardinalidade seja 1 apenas incluirá um agente, caso a cardinalidade seja 1..\* o analista pode redefinir a sua multiplicidade no código da tarefa que dá início à interação, determinando quais são os agentes que podem participar nela. Exemplo disso é a tarefa *ObtainGUData\_T* da *GenCo* onde se especifica que se pretende interagir apenas com as *GenUnits<sub>GenCo</sub>* que esta detém, como mostrado de seguida.

```

1: for(java.lang.String genUnit:eiObtainGUData_E.getGU_List()){
2:     outputsdefaultGC_GU_Inter.addCollaborators(genUnit);
3: }

```

Para além da *GenCo* também a *Pool* especifica quais os agentes *GenCo* e *DemCo* com quem quer interagir. Contudo, por omissão, se a etiqueta tiver cardinalidade 1..\*, todos os agentes com o papel do colaborador são incluídos.

A entidade de interação inserida representa a interação e serve de referência noutras entidades (e.g. a utilização da interação na entidade de conversação).

As definições das várias interações do SMA proposto são apresentadas na figura 4.24.

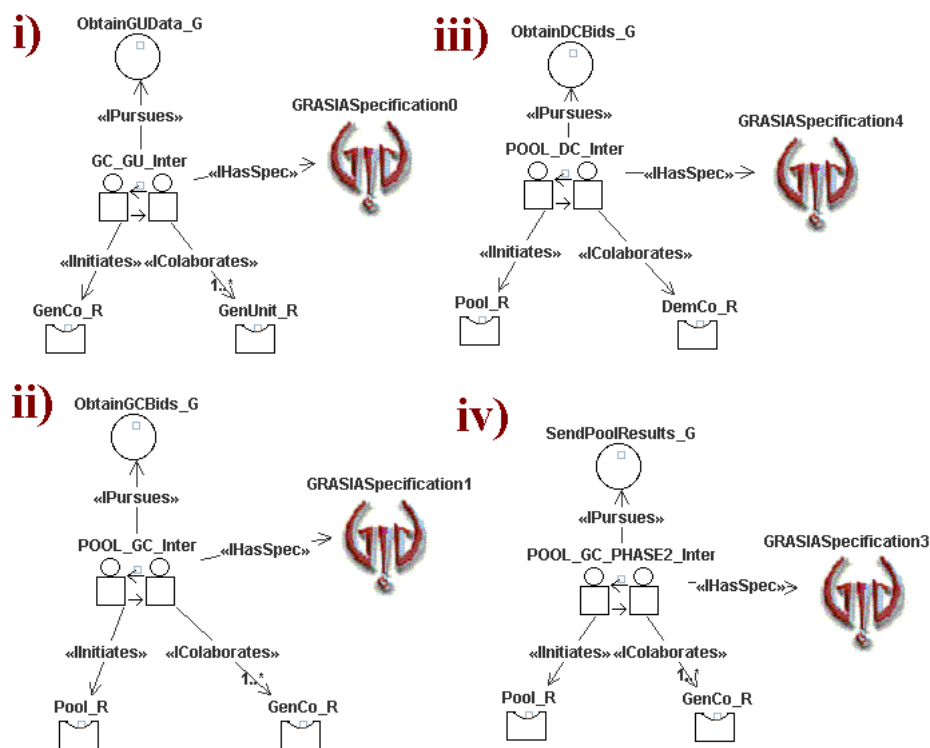


FIGURA 4.24: Definição das interações do SMA.

Note que os objectivos associados às interações estão também associados, nos modelos de agente apresentados na secção anterior, aos papéis participantes na interacção. Todas as interações, excepto a interacção entre a *Pool* e a *DemCo* (iii), têm o colaborador com carnalidade 1.\*. A interacção da *Pool* com a *DemCo* tem carnalidade 1 (a por omissão) porque existe apenas uma *DemCo*.

As definições feitas na figura 4.24 correspondem às várias interações entre as entidades do mercado eléctrico, mostradas simbolicamente na figura 4.25.

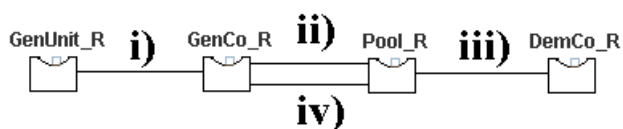


FIGURA 4.25: Interações do SMA.

Onde:

- i. representa a interacção entre a *GenCo* e as *GenUnits<sub>GenCo</sub>* para a *GenCo* obter os custos marginais das suas *GenUnits<sub>GenCo</sub>*;

- ii. representa a interacção entre a *Pool* e as *GenCos* para a *Pool* receber as ofertas de venda de energia das *GenCos*;
- iii. representa a interacção entre a *Pool* e a *DemCo* para a *Pool* receber as ofertas de compra de energia da *DemCo*, e;
- iv. representa a interacção entre a *Pool* e as *GenCos* para a *Pool* enviar os resultados do mercado às *GenCos*.

**Protocolo.** O protocolo GRASIA da figura 4.24 refere outro diagrama de interacção, onde se define o protocolo utilizado.

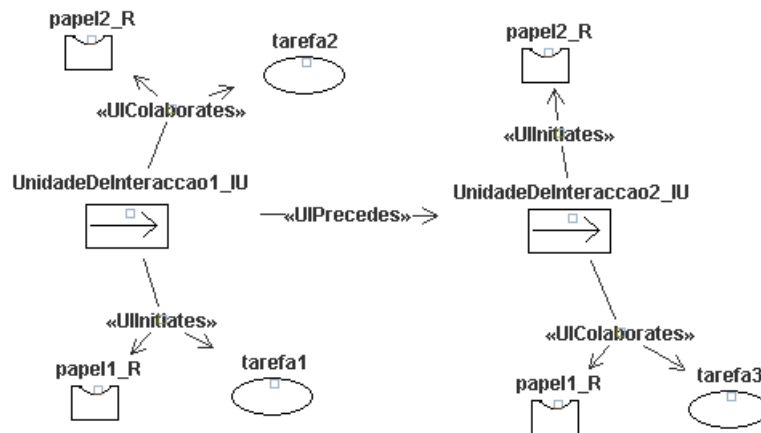


FIGURA 4.26: Definição típica do protocolo.

Esse protocolo de interacção é tipicamente definido através de unidades de interacção, que representam a informação trocada entre os agentes. Estas unidades têm um iniciador (relação *UIInitiates*), que entrega a informação, e um colaborador (relação *UIColaborates*), que concorda em recebe-la. As unidades de interacção quando são associadas ao seu iniciador e colaborador estão desordenadas, sendo preciso definir a ordem em que se precedem no tempo através da relação *UIPrecedes*.

O protocolo de interacção permite ter tarefas associadas às relações *UIInitiates* e *UIColaborates*. Esta associação de tarefas está relacionada com a forma como a informação das unidades de interacção é gerada e guardada. Normalmente, a informação presente nas unidades de interacção está sobre a forma de repositórios de factos.

Na figura 4.28 estão definidos os protocolos de interacção do SMA proposto. Estes seguem as interacções mostradas, novamente, na figura 4.27.

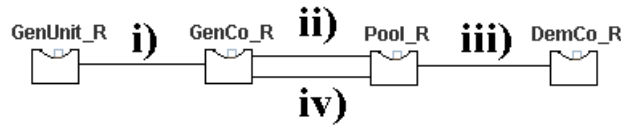


FIGURA 4.27: Interações do SMA.

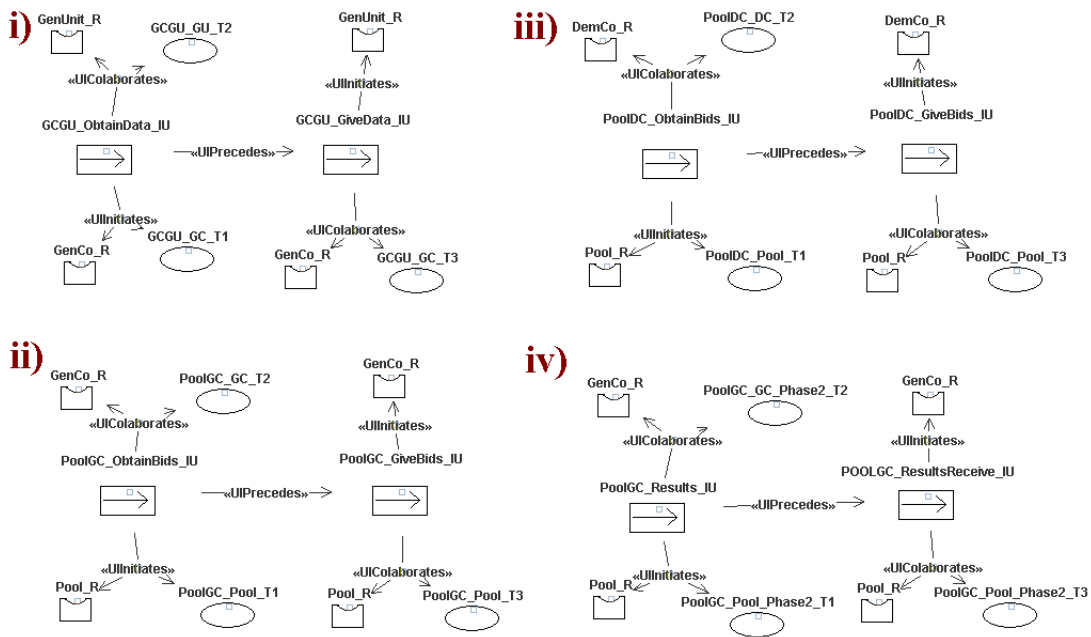


FIGURA 4.28: Protocolos de interacção do SMA.

Onde:

i) corresponde ao protocolo de interacção entre a *GenCo* e as suas *GenUnits<sub>GenCo</sub>*.

O referido protocolo tem o seguinte fluxo de informação:

1. na tarefa GCGU\_GC\_T1 a *GenCo* coloca a informação que pretende enviar às suas *GenUnits<sub>GenCo</sub>* na unidade de interacção (i.e. o dia pretendido para a formação dos custos marginais e se estes devem incluir preços reais de combustível ou preços de omissão);

2. as  $GenUnits_{GenCo}$  por sua vez, ao receber o pedido da  $GenCo$  processam-no na tarefa  $GCGU\_GU\_T2$ , e respondem com as ofertas a custo marginal e com informação relevante para a  $GenCo$  tomar decisões (e.g. tecnologia, capacidade máxima, tempo de arranque, tempo de paragem);
3. para finalizar, a  $GenCo$  ao receber as informações das suas  $GenUnits_{GenCo}$  armazenam-na, através da tarefa  $GCGU\_GC\_T3$ .

Para melhor se perceber a relação entre as tarefas e a informação em causa é mostrado na figura 4.29 o modelo de tarefas e objectivos das mesmas.

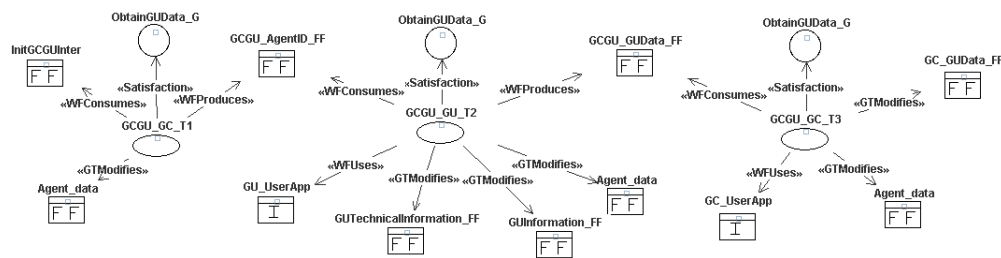


FIGURA 4.29: Modelo de tarefas e objectivos das tarefas envolvidas no protocolo de interação da  $GenCo$  com as suas  $GenUnits_{GenCo}$ .

ii) corresponde ao protocolo de interação entre a  $Pool$  e as  $GenCos$ . O referido protocolo tem o seguinte fluxo de informação:

1. através da tarefa  $PoolGC\_Pool\_T1$  a  $Pool$  insere na unidade de interacção a informação sobre o dia e jogo corrente para o qual pretende receber as ofertas de venda;
2. as  $GenCos$ , ao receber o pedido da  $Pool$ , na tarefa  $PoolGC\_GC\_T2$  geram as ofertas de venda de energia, com a ajuda da instância R, e respondem ao pedido;
3. a  $Pool$ , ao receber a informação das várias  $GenCos$  verifica, na tarefa  $PoolGC\_Pool\_T3$ , se já recebeu todas as respostas esperadas e se isso se verificar processa o mercado  $Pool$  com a ajuda da instância R.

Para melhor se perceber a relação entre as tarefas e a informação em causa, a figura 4.30 mostra o modelo de tarefas e objectivos das mesmas.

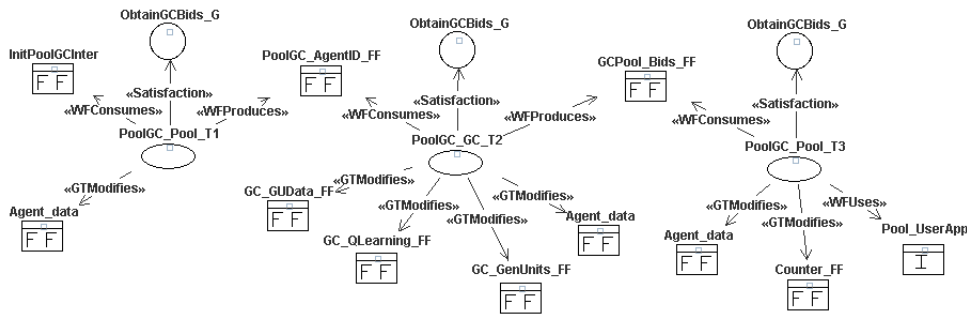


FIGURA 4.30: Modelo de tarefas e objectivos das tarefas envolvidas no protocolo de interação da *Pool* com as *GenCos*.

iii) corresponde ao protocolo de interação entre a *Pool* e a *DemCo*. O referido protocolo tem o seguinte fluxo de informação:

1. através da tarefa *PoolDC\_Pool\_T1* a *Pool* envia a informação sobre o dia e jogo corrente para o qual pretende receber as ofertas de compra;
2. a *DemCo*, ao receber o pedido da *Pool* processa a tarefa *PoolDC\_DC\_T2* e responde com as ofertas de compra;
3. a *Pool*, ao receber essas informações verifica, através da tarefa *PoolDC\_Pool\_T3*, se já recebeu todas as respostas esperadas e se isso se verificar processa o mercado *Pool* com a ajuda da instância *R*.

Para melhor se perceber a relação entre as tarefas e a informação em causa, a figura 4.31 mostra o modelo de tarefas e objectivos das mesmas.

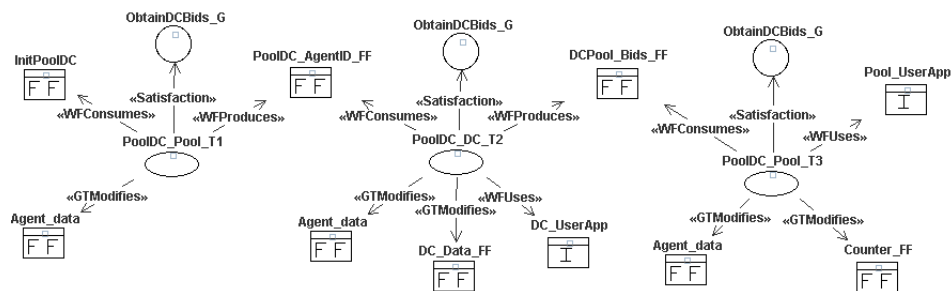


FIGURA 4.31: Modelo de tarefas e objectivos das tarefas envolvidas no protocolo de interação da *Pool* com a *DemCo*.

iv) corresponde ao protocolo de interação entre a *Pool* e as *GenCos* referente à entrega dos resultados do mercado. O referido protocolo tem o seguinte fluxo de informação:

1. através da tarefa PoolGC\_Pool\_Phase2\_T1 a *Pool* carrega os resultados privados e públicos do mercado para a unidade de interação e envia-os às *GenCos*;
2. as *GenCos* ao receberem a informação da *Pool*, guardam-na em memória persistente, processam-na através do R, para obter outros resultados privados (e.g. o lucro), e actualizam o método Q-Learning, caso isso se aplique. Depois, avisam a *Pool* que receberam os resultados;
3. ao receber essa informação, a *Pool*, na tarefa PoolGC\_Pool\_Phase2\_T3, verifica se todas as *GenCos* receberam os resultados de mercado para poder avançar para o próximo dia.

Para se perceber melhor a relação entre as tarefas e a informação em causa, a figura 4.32 mostra o modelo de tarefas e objectivos das mesmas.

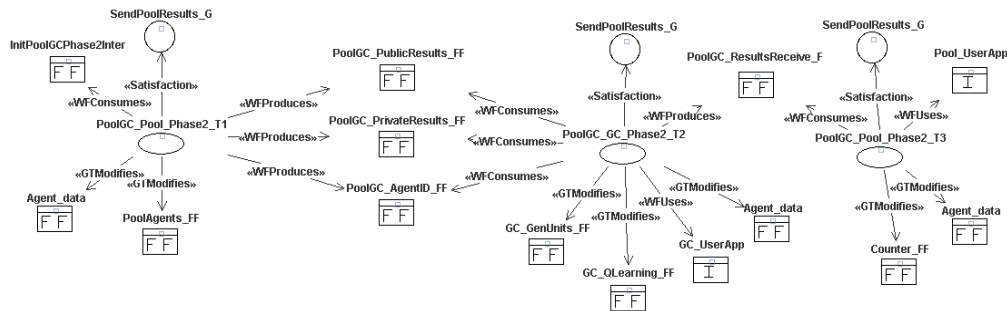


FIGURA 4.32: Modelo de tarefas e objectivos das tarefas envolvidas no protocolo de interação da *Pool* com as *GenCos* (envio dos resultados de mercado).

### 4.2.3 Configuração de cenários

A configuração de cenários para simulação na plataforma INGENIAS é feita recorrendo-se à entidade DeploymentPackage. Esta entidade, do diagrama de implantação ("Deployment"), serve para iniciar um conjunto de agentes.

O diagrama de implantação permite alterar a configuração dos cenários de forma fácil, removendo e adicionando DeploymentUnits a um DeploymentPackage. Existem dois

tipos de DeploymentUnits. O tipo DeploymentUnitByType, onde é possível indicar o tipo de agente e o número de instâncias desse agente que se quer criar, e o tipo DeploymentUnitByTypeEnumInit, que para além de se poder indicar o tipo de agente e o seu número de instâncias, se pode indicar também as suas entidades mentais iniciais (e.g. repositórios de factos) e que valores estão associados a essas entidades.

Nas definições das experiências deste trabalho, utilizou-se somente o tipo DeploymentUnitByTypeEnumInit, uma vez que todos os agentes presentes no SMA possuem repositórios de factos que são configurados inicialmente. A título de exemplo, na figura 4.33 está presente o diagrama de implantação da experiência #2 da secção 5.3, onde consta um tipo de operador de mercado(Pool\_A), um tipo de comprador (DemCo\_A), dois tipos de empresas produtoras (GenCo\_A e GenCo\_B), e três tipos de unidades de produção (GenUnit\_A, GenUnit\_B e GenUnit\_C). O número de instâncias é indicado por *ninstances*. As diversas entidades mentais iniciais são indicadas por *pieceOfInitialMS*. De notar, que na figura 4.33 o tipo DeploymentUnitByTypeEnumInit é abreviado para DeplmntUnitEnumMS.

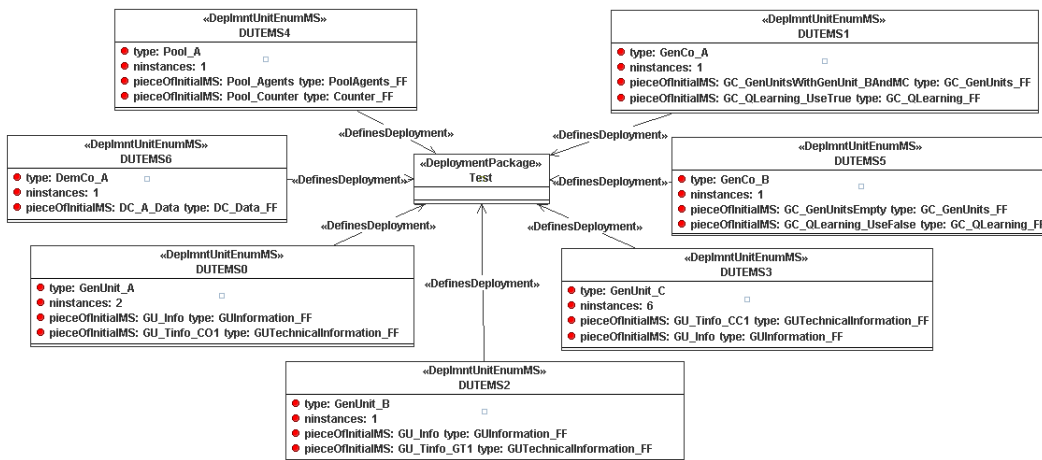


FIGURA 4.33: Diagrama de implantação da experiência #2.

### 4.3 Apoio à tomada de decisão

A complexidade introduzida pela liberalização e integração dos mercados eléctricos traz dificuldades aos agentes licitadores de energia, principalmente aos vendedores (onde há mais competição), que vêem acentuado o papel da tomada de decisão no momento de colocar as ofertas de energia em mercado. Este aspecto é ainda mais relevante no caso da

liberalização do mercado ser recente (o que acontece em alguns países, como Portugal), que associa à complexidade do mercado a falta de experiência de licitação no novo modelo. Estas dificuldades fomentam a busca de soluções que apoiem a sua tomada de decisão, apontando estratégias para licitar a energia em mercado.

Para apoiar a tomada de decisão dos agentes vendedores de energia (*GenCos*) dotou-se o simulador proposto com aprendizagem, mais especificamente, aprendizagem por reforço usando o método Q-learning (especificado na secção 2.2.1). O objectivo deste método é identificar a melhor forma de uma *GenCo* jogar contra o seu oponente (as restantes *GenCos*), determinando as acções (i.e estratégias) que deve utilizar nas diversas unidades produtoras (*GenUnits<sub>GenCo</sub>*), de modo a obter o maior lucro possível com a venda da energia.

Para adaptar o método Q-learning ao simulador proposto há a necessidade de especificar as acções, os estados, a função de reforço e a política de escolha das acções que o método utiliza:

- Como a acção de uma *GenCo* é especificar, individualmente, as estratégias das suas *GenUnits<sub>GenCo</sub>*, as acções possíveis no método Q-learning,  $\mathcal{A}$ , serão os vários modos, ou combinações, de aplicar estratégias às *GenUnits<sub>GenCo</sub>*. As estratégias utilizadas no Q-Learning podem ser, no máximo, as mesmas 13 estratégias que o utilizador pode aplicar manualmente às *GenUnits<sub>GenCo</sub>* (cf. secção 4.1.2).
- Os estados possíveis,  $\mathcal{S}$ , correspondem ao número de intervalos, especificado pelo utilizador, em que se divide a percentagem de quota de mercado da *GenCo*.
- O reforço,  $R(s, a)$ , é o lucro (i.e., receita - despesa) que a *GenCo* obtém quando se encontra no estado  $s \in \mathcal{S}$  e executa a acção  $a \in \mathcal{A}$ . As receitas são obtidas através do preço de fecho do mercado Pool e da quantidade de energia vendida. As despesas dependem dos custos marginais das *GenUnits<sub>GenCo</sub>* que produzem a energia vendida.
- A política de escolha das acções utilizada no método Q-learning é a heurística  $\epsilon$ -ambiciosa. Com esta política o agente executa uma acção aleatória com probabilidade  $\epsilon$  e usufrui do conhecimento adquirido com probabilidade  $1 - \epsilon$ . A probabilidade  $\epsilon$  é determinada em função do número de dias jogados,  $diaJ$ , e do número de pares estado-acção existentes,  $nEA$ , através da fórmula  $\epsilon = \exp(-(nEA \times \zeta)^{-0.7} \times$

$diaJ$ ), de modo a aprender mais rápido no início do processo de aprendizagem e a usufruir mais do conhecimento adquirido à medida que vai convergindo para  $Q^*$ . O  $\zeta$  é um factor de ajuste.

A integração do método Q-learning no simulador respeita a sua forma procedimental, descrita pelo pseudocódigo:

- 1:** para cada estado  $s$  e acção  $a$  inicializar  $Q(s, a) = 0$
- 2:** repetir por cada episódio (i.e. jogo):
- 3:**     inicializar  $s$
- 4:**     repetir para cada passo (i.e. dia) do episódio:
- 5:**         escolher  $a$  a partir de  $s$  usando a política de acções (i.e.  $\epsilon$ -ambiciosa)
- 6:**         executar a acção  $a$
- 7:**         receber o reforço  $R(s, a)$
- 8:**         observar o novo estado  $s'$
- 9:**         actualizar  $Q(s, a)$  de acordo com a regra de actualização
- 10:**         $s \leftarrow s'$

A integração no simulador foi feita da seguinte forma. A *GenCo* ao iniciar executa o passo 1. No início de cada jogo executa o passo 3. Quando recebe o pedido do operador de mercado para enviar as ofertas de venda de energia executa os passos 5 e 6. Ao receber a informação do resultado do mercado (passos 7 e 8) executa o passo 9 e 10.

## Capítulo 5

# Estudo de Caso

Neste capítulo efectua-se algumas experiências ao simulador multi-agente proposto para o mercado eléctrico (cf. capítulo 4), de modo a analisar o seu comportamento (e.g. a aprendizagem de políticas de licitação), e o comportamento do mercado eléctrico que daí resulta.

Todas as experiências efectuadas neste capítulo foram feitas num portátil Acer Aspire 1640 (Intel Pentium M 760, processador 2.00 GHz, 1 GB de RAM) a correr sobre o sistema operativo Windows XP Pro SP2. A execução das experiências demoram, em média, cerca de 1.5 minutos por cada mês simulado, variando este tempo com o número de estados e acções da aprendizagem por reforço e com o número de *GenUnits* e *GenCos* do sistema.

### 5.1 Caracterização das unidades de produção

As experiências #1, #2 e #3, explicadas mais à frente, utilizam os mesmos tipos de unidades de produção (*GenUnits*), i.e., consideram três tipos de *GenUnits*: i) *GenUnits* térmicas baseadas em carvão (CO), ii) *GenUnits* com turbinas a gás (GT) e iii) *GenUnits* de ciclo combinado com turbinas a gás (CCGT). Podendo uma *GenCo* possuir zero ou muitas *GenUnits* do mesmo tipo.

A tabela 5.1 mostra as propriedades essenciais de cada tipo de unidade de produção e a tabela 5.2 os patamares de "heat rate" utilizados pela fórmula `WithHeatRate` para calcular o seu custo marginal.

Propriedade	Unidade	Tipo de unidade de produção		
		CO	CCGT	GT
Combustível	---	Carvão	Gás Natural	Gás Natural
Preço do Combustível	€/MMBtu	1.5	5	5
Capacidade	MW	500	250	125
Custo variável de operação e manutenção	€/MWh	1.75	2.8	8

TABELA 5.1: Propriedades das unidades de produção.

CO			
Capacidade (MW)	Heat rate (Btu/kWh)	Capac. Bloco (MW)	Custo Marginal (€/MWh)
250	12000	---	---
350	10500	350	11.9
400	10080	50	12.5
450	9770	50	12.7
500	9550	50	13.1

CCGT				GT			
Capacidade (MW)	Heat rate (Btu/kWh)	Capac. Bloco (MW)	Custo Marginal (€/MWh)	Capacidade (MW)	Heat rate (Btu/kWh)	Capac. Bloco (MW)	Custo Marginal (€/MWh)
100	9000	---	---	50	14000	---	---
150	7800	150	29.8	100	10600	100	44
200	7200	50	29.8	110	10330	10	46.2
225	7010	25	30.3	120	10150	10	48.9
250	6880	25	31.4	125	10100	5	52.5

TABELA 5.2: Patamares de "heat rate" e custos marginais das unidades de produção.

## 5.2 Experiência #1

Esta experiência pretende verificar se um agente *GenCo* com aprendizagem, ao licitar a energia das suas *GenUnits<sub>GenCo</sub>*, persegue o objectivo devido, i.e., a maximização dos lucros. O cenário da experiência é apresentado na tabela 5.3.

<i>GenCo</i>		<i>GenUnits</i>		<i>DemCo</i>
Nome	Capac. de produção (MW)	Tipos Utilizados	Fórmula CM	
GenCo_activa	875	1xCO & 1xCCGT & 1xGT	WithHeatRate	Procura semanal constante de 800 MW

TABELA 5.3: Cenário da experiência #1.

O termo *activa* (na coluna *Nome*) indica que a *GenCo* tem aprendizagem e a coluna *Fórmula CM* indica a fórmula utilizada no cálculo dos custos marginais das *GenUnits<sub>GenCo</sub>*. As propriedades e os patamares de "heat rate" das *GenUnits* CO, CCGT e GT, são indicados na tabela 5.1 e 5.2, respectivamente.

Na configuração da aprendizagem da *GenCo\_activa*, o método Q-learning possui 2 acções (i.e. estratégias) possíveis, a estratégia BigUp e BigDown (cf. secção 4.1.2). A estratégia BigUp sobe o preço da licitação do dia anterior em 5€. A estratégia BigDown desce o mesmo montante na licitação do dia anterior. Nos estados possíveis, como existe só 1 *GenCo*, esta possui toda a quota de mercado (i.e. existe apenas um estado). Nos diversos factores de ajuste tem-se o factor da política  $\epsilon$ -ambiciosa com,  $\zeta=7$ , e os restantes factores do Q-learning com,  $\gamma=0.9$  e  $\alpha=0.1$ .

Os resultados obtidos nesta experiência indicam que a *GenCo* procura maximizar os seus lucros (i.e. converge para a política óptima), pois o seu lucro ao longo das iterações aumenta (figura 5.1) até estabilizar nos 3M€ (devido ao preço máximo das ofertas se fixar nos 180€).

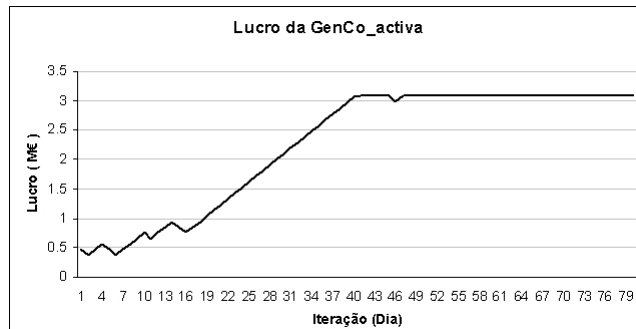


FIGURA 5.1: Processo de aprendizagem da política óptima que maximiza o lucro.

A figura 5.2 mostra as ofertas licitadas em mercado pela *GenCo\_activa* na hora 1 da iteração 79. Através dela, é possível verificar que a *GenCo\_activa* aprende a melhor forma de licitar a sua energia em mercado, a forma que maximiza o lucro obtido. Colocando a energia das 2 *GenUnits<sub>GenCo</sub>* com custos marginais mais baixos (i.e. CO e CCGT) a custo 0 e a *GenUnit<sub>GenCo</sub>* mais cara (i.e. GT) a marcar preço de mercado.

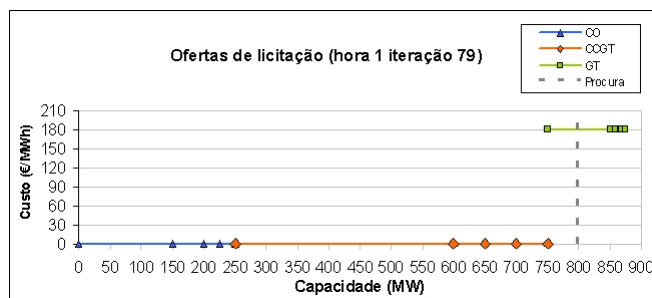


FIGURA 5.2: Ofertas de licitação da *GenCo\_activa* na hora 1 da iteração 79

### 5.3 Experiência #2

Esta experiência pretende averiguar se uma *GenCo* com aprendizagem consegue aproveitar a janela de oportunidade concedida por outra *GenCo*, i.e., verificar se consegue explorar o intervalo de preços compreendido entre o preço de produção das suas *GenUnits<sub>GenCo</sub>* e o preço da energia de outra *GenCo*, de modo a roubar quota de mercado a esta última,

para maximizar os seus lucros. O cenário montado para esta experiência é apresentado na tabela 5.4.

<i>GenCo</i>		<i>GenUnits</i>		<i>DemCo</i>
Nome	Capac. de produção (MW)	Tipos Utilizados	Fórmula CM	
GenCo_grande	2000	2xCO & 4xCCGT	WithHeatRate	Procura semanal constante de 2000 MW
GenCo_pequena&activa	625	2xCCGT & 1xGT	WithHeatRate	

TABELA 5.4: Cenário da experiência #2.

Neste cenário temos uma *GenCo* grande, com muita capacidade de produção, que licita a energia das suas *GenUnits<sub>GenCo</sub>* sempre ao mesmo preço (i.e., soma sempre 5€ ao custo marginal de produção), fornecendo assim, uma janela de oportunidade para outras *GenCos* explorarem. Essa exploração, pretende-se fazer com a *GenCo\_pequena&activa*, que deverá roubar quota de mercado à *GenCo\_grande* para aumentar os seus lucros. No início desta experiência, a *GenCo\_pequena&activa* parte dum posição zero de quota de mercado, porque a energia das suas *GenUnits<sub>GenCo</sub>* foi colocada, propositadamente, 13€ acima do custo marginal de produção, de modo a estar acima do preço de mercado.

Na configuração da aprendizagem da *GenCo\_pequena&activa*, o método Q-learning possui 3 estratégias, i.e., a estratégia BigUp, BigDown e Hold (cf. secção 4.1.2). A estratégia BigUp sobe o preço da licitação do dia anterior em 5€. A estratégia BigDown desce o mesmo montante na licitação do dia anterior. E a estratégia Hold, mantém o mesmo preço da licitação do dia anterior. Nos estados possíveis, temos a percentagem de quota de mercado do agente dividida em 14 partes, onde apenas 5 desses estados são utilizados, uma vez que a quota da *GenCo\_pequena&activa* está compreendida entre 0% e 31,25%. Nos diversos factores de ajuste tem-se,  $\zeta=0.5$ ,  $\gamma=0.7$  e  $\alpha=0.1$ .

Os resultados obtidos na experiência (figura 5.3), indicam que a *GenCo\_pequena&activa* consegue roubar 8.35% de quota de mercado à *GenCo\_grande*.

Os picos de quota de mercado verificados na *GenCo\_pequena&activa* (a rondar os 30.3%) são causados pela sua *GenUnit<sub>GenCo</sub>* GT, quando esta entra em mercado (i.e. vende a energia, pelo menos, ao preço de fecho do mercado). Contudo, como se verifica pela figura 5.4, esse aumento de quota não é benéfico, pois o lucro da *GenCo* diminui nesses periodos. Essa diminuição deve-se ao facto dos custos marginais de produção da *GenUnit<sub>GenCo</sub>* GT serem maiores que o preço de fecho de mercado, e assim sendo, a receita da energia vendida não cobre o seu custo de produção.

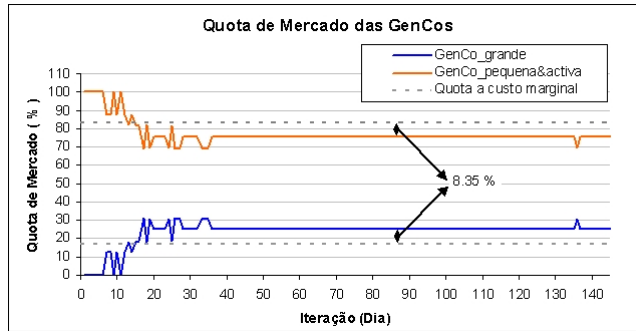


FIGURA 5.3: Evolução da quota de mercado conduzida pela GenCo\_pequena&activa.

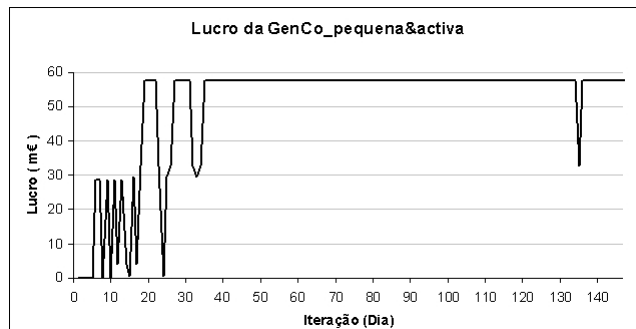


FIGURA 5.4: Lucro da GenCo\_pequena&activa.

Para a GenCo\_pequena&activa maximizar os seus lucros, o melhor mesmo, é manter a quota de mercado roubada à GenCo\_grande nos 8.35%, ficando a  $GenUnit_{GenCo}$  GT sem vender energia (figura 5.5).

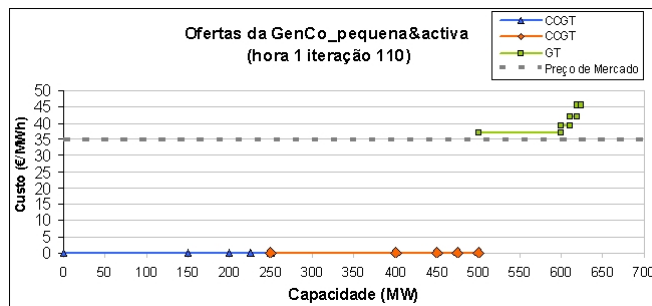


FIGURA 5.5: Ofertas de licitação da GenCo\_pequena&activa na hora 1 da iteração 110.

## 5.4 Experiência #3

Esta experiência pretende analisar o comportamento do mercado eléctrico quando duas *GenCos* com aprendizagem competem entre si. O cenário montado para esta experiência é apresentado na tabela 5.5.

<i>GenCo</i>		<i>GenUnits</i>		<i>DemCo</i>
Nome	Capac. de produção (MW)	Tipos Utilizados	Fórmula CM	
GenCo_grande&activa	1750	2xCO & 3xCCGT	WithHeatRate	Procura num contexto semanal com mínimo constante nos 1500 MW e máximo constante nos 1750 MW
GenCo_pequena&activa	625	2xCCGT & 1xGT	WithHeatRate	

TABELA 5.5: Cenário da experiência #3.

Na configuração da aprendizagem por reforço, em ambas as *GenCos*, tem-se o método Q-learning com 4 estratégias possíveis, i.e., a estratégia Up, Down, Hold e MarginalCost (cf. secção 4.1.2). A estratégia Up sobe o preço da licitação do dia anterior em 1€. A estratégia Down desce o mesmo montante na licitação do dia anterior. A estratégia Hold, mantém o mesmo preço da licitação do dia anterior. E a estratégia MarginalCost, licita a energia do agente ao custo marginal de produção. Nos estados possíveis, tem-se a percentagem de quota de mercado do agente dividida em 12 estados. Os diversos factores de ajuste possuem os valores,  $\zeta=0.7$ ,  $\gamma=0.7$  e  $\alpha=0.1$ .

Os resultados obtidos nesta experiência (figura 5.6), indicam que as *GenCos* competem para ganhar uma franja de quota de mercado, e que ao longo das iterações, essa franja converge para um valor menor. É notório também, que a *GenCo\_grande&activa* consegue ganhar mais quota de mercado que a *GenCo\_pequena&activa* (em relação à quota a custos marginais).

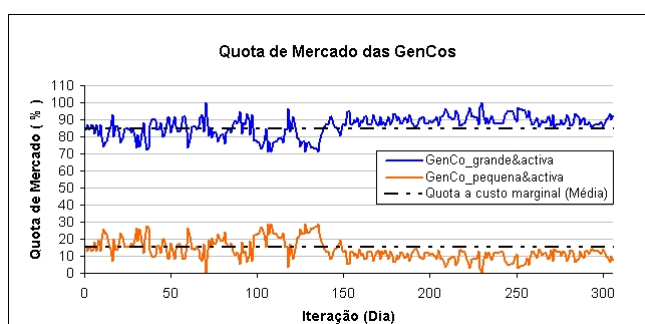


FIGURA 5.6: Evolução da quota de mercado.

A competitividade entre ambas é grande, como mostra a figura 5.7, onde se pode verificar que a competitividade nos preços de venda da energia faz as *GenCos* terem de licitar a energia quase ao custo marginal de produção.

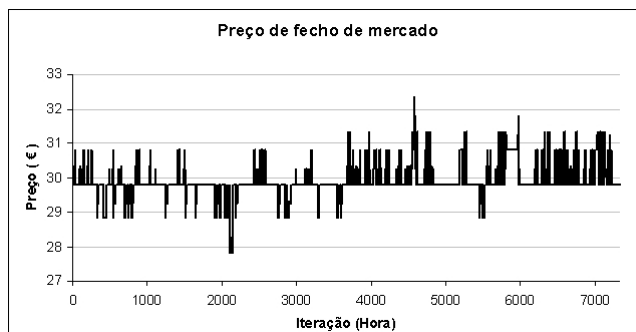


FIGURA 5.7: Preço de fecho de mercado.



## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

Esta dissertação pretende fornecer aos agentes do mercado eléctrico uma ferramenta para lidar com a complexidade e competitividade introduzidas no mercado eléctrico pela sua liberalização e integração com outros mercados. Para atingir esse propósito, construiu-se um simulador multi-agente que, tendo como referência o mercado diário do MIBEL, representa as entidades do mercado eléctrico em agentes autónomos. Neste simulador, modelado com o INGENIAS, estão presentes as entidades unidades produtoras, onde é gerada a energia eléctrica, as empresas produtoras, que licitam a energia das suas unidades produtoras em mercado, o comprador, representando todo o consumo, e a entidade operadora de mercado, que gere o modelo Pool, num contexto de mercado do dia seguinte e como um leilão de venda.

O simulador tem como objectivo apoiar os agentes do mercado na análise do comportamento do mercado eléctrico. Pelos resultados obtidos, conclui-se que o simulador proposto é uma ferramenta válida para esse tarefa, apesar das suas limitações no que diz respeito às características simuladas (visto ser apenas um protótipo), pois é necessário incrementá-lo de forma a aproximar-se da realidade do mercado eléctrico.

Adicionalmente, para apoiar a tomada de decisão dos agentes vendedores de energia integrou-se no simulador proposto a capacidade de aprendizagem, através da aprendizagem por reforço. A utilização da aprendizagem por reforço permite ajudar o agente vendedor a responder da melhor forma às estratégias de outros agentes, como corroboram os resultados obtidos nas experiência.

Comparativamente a outros simuladores existentes, o simulador construído é uma mais valia, pela sua modelação de alto nível e pelo conjunto das suas características, i.e., por garantir interoperabilidade com outros agentes, por ser flexível na construção de estratégias e por poder funcionar num âmbito distribuído.

O simulador multi-agente proposto para o mercado eléctrico integra três áreas, i.e., o mercado eléctrico, os sistemas multi-agente e a aprendizagem, e, uma vez que os resultados obtidos mostram um mercado eléctrico com comportamento coerente, este pode servir de base para uma futura exploração, refinando-se as áreas utilizadas no simulador para produzir uma ferramenta comercial.

## 6.1 Trabalho futuro

Ao trabalhar com as diversas áreas que integram este simulador, i.e., o mercado eléctrico, a aprendizagem, e os sistemas multi-agente, é notório que existe muito trabalho feito, individualmente, nestas áreas e que têm ainda margem de progressão, contudo, a sua integração é um aspecto que também deve ser investigado e desenvolvido pois o resultado final pode ter muito potencial. Algumas das áreas de desenvolvimento que podem ser exploradas na continuação deste simulador estão relacionadas com a limitação da aprendizagem por reforço e com o refinamento do mercado eléctrico simulado. Este dois aspectos são desenvolvidos de seguida.

**Aprendizagem.** Apesar da aprendizagem por reforço convergir para a política óptima de licitação, essa convergência é lenta. Esse problema ganha relevância quando se utiliza a aprendizagem por reforço num cenário onde o número de estados e acções é grande. Assim, uma área de desenvolvimento será melhorar a aprendizagem por reforço utilizada ou utilizar outras técnicas de aprendizagem para melhorar o tempo de convergência num espaço de pares estado-acção com dimensão considerável. Outro aspecto que também pode ser revisto, é a inclusão de factores com influência no mercado eléctrico na aprendizagem, factores como o tipo de dia simulado, i.e., se é um dia útil, um feriado ou fim-de-semana, e a caracterização do nível de carga do sistema, i.e., se está em ponta, cheio, ou vazio.

**Mercado Eléctrico.** Uma vez que não foi possível abordar todos os aspectos do mercado eléctrico no presente simulador, devido à complexidade do mercado, estes podem ser

---

adicionados futuramente. Aspectos relacionados com os agentes já existentes, como por exemplo, possibilitar que o agente vendedor possa fazer ofertas complexas, de modo a ter em conta os tempos de paragem e arranque das suas unidades produtoras. Aspectos relacionados com a criação de novos agentes, como a criação do operador de sistema, para se ter em conta a congestão das linhas de transmissão nos resultados de mercado. E aspectos relacionados com o próprio modelo de mercado, que ao existente (i.e. o modelo Pool) podem ser adicionados outros modelos (e.g. modelo de contratos bilaterais físicos).



## Apêndice A

# Ofertas Complexas

O mercado diário do MIBEL permite ofertas complexas com as seguintes condições:

- **Condição de indivisibilidade.**

Com esta condição, se um bloco indivisível de uma oferta é aceite pelo operador de mercado, toda a energia ofertada nesse bloco tem de ser aceite e não apenas parte dela. A condição de indivisibilidade só pode ser incorporada na oferta do primeiro bloco de cada hora, aquele que tem menor preço;

- **Condição de receita mínima.**

Esta condição permite a realização de ofertas para todas as horas, embora tenha em conta que o produtor não participa no mercado diário, se não obtiver para o conjunto da sua produção no dia, uma entrada superior a uma quantidade fixa, estabelecida em cêntimos de euros, mais uma remuneração variável estabelecida em cêntimos de euro por kWh.

- **Condição de paragem programada.**

A condição presente permite que, caso a unidade de produção tenha sido retirada do mercado diário por não cumprir a condição solicitada de receita mínima, sejam considerados os primeiros blocos dos três primeiros períodos de programação. A energia ofertada que incorpore esta condição tem de ser decrescente durante os três primeiros períodos horários de programação, e não será aplicada a condição de variação de capacidade de produção a estes mesmos períodos;

- **Condição de variação de capacidade de produção ou gradiente de carga.**

De modo a evitar mudanças bruscas nas unidades que não podem, tecnicamente, seguir as mesmas, é possível com esta condição estabelecer uma variação máxima de produção, para cima ou para baixo, em dois períodos horários consecutivos, podendo-se também incluir a variação correspondente ao arranque ou paragem da unidade de produção.

# Bibliografía

- BAGNALL, A.J., & SMITH, G.D. 2005. A multiagent model of the UK market in electricity generation. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, **9**(5), 522–536.
- BELLIFEMINE, F.L., CAIRE, G., GREENWOOD, D., & NETLIBRARY, I. 2007. *Developing Multi-agent Systems with JADE*. Springer.
- BOTTERUD, A., KORPÁS, M., VOGSTAD, K.O., & WANGENSTEEN, I. 2002. A dynamic simulation model for long-term analysis of the power market. *In: Proceedings, 14th Power Systems Computation Conference (PSCC '02)*.
- BOTTERUD, A., THIMMAPURAM, P.R., & YAMAKADO, M. 2008. Simulating GenCo bidding strategies in electricity markets with an agent-based model. *Proceedings of the Seventh Annual IAEE (International Association for Energy Economics) European Energy Conference (IAEE-05)*, August, 28–30.
- BREEZE, P.A. 2005. *Power Generation Technologies*. Elsevier/Newnes.
- BUNN, D., & OLIVEIRA, F. 2001. Agent-based simulation-an application to the new electricitytrading arrangements of England and Wales. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, **5**(5), 493–503.
- CHEYER, A., & MARTIN, D. 2001. The Open Agent Architecture. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, **4**(1), 143–148. OAA.
- CONTRERAS, J., CANDILES, O., DE LA FUENTE, J.I., & GOMEZ, T. 2001a. Auction design in day-ahead electricity markets. *Power Systems, IEEE Transactions on*, **16**(3), 409–417.

- CONTRERAS, J., LOSI, A., & RUSSO, M. 2001b. JAVA/MATLAB simulator for power exchange markets. *Power Industry Computer Applications, 2001. PICA 2001. Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on*, 106–111.
- CONTRERAS, J., CONEJO, A.J., DE LA TORRE, S., & MUNOZ, M.G. 2002. Power engineering lab: electricity market simulator. *Power Systems, IEEE Transactions on*, **17**(2), 223–228.
- CONZELMANN, G., BOYD, G., KORITAROV, V., & VESELKA, T. 2005. Multi-agent power market simulation using EMCAS. *Pages 917–922 of: Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*.
- ERSE. 2007 (Setembro). *Mercado Liberalizado em Portugal de Electricidad - Um ano após 4 de Setembro de 2006*.
- GÓMEZ-EXPÓSITO, A., CONEJO, A.J., & CAÑIZARES, C. 2008. *Electric Energy Systems - Analysis and Operation*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- GÓMEZ-SANZ, J. 2002 (Junio). *Modelado de Sistemas Multi-Agente*. Ph.D. thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- GÓMEZ-SANZ, JORGE J., FUENTES-FERNÁNDEZ, RUBÉN, PAVÓN, JUAN, & GARCÍA-MAGARIÑO, IVÁN. 2008. INGENIAS Development Kit: a visual multi-agent system development environment (BEST ACADEMIC DEMO OF AAMAS'08). May 12-16, 2008, Estoril Portugal.
- HARP, S.A., BRIGNONE, S., WOLLENBERG, B.F., & SAMAD, T. 2000. SEPIA. A simulator for electric power industry agents. *Control Systems Magazine, IEEE*, **20**(4), 53–69.
- HONG, Y., TSAI, W., & WENG, T. 2001. Bidding strategy based on artificial intelligence for a competitive electric market. *Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings*, **148**(2), 159–164.
- KILANC, G.P., & OR, I. 2008. A decision support tool for the analysis of pricing, investment and regulatory processes in a decentralized electricity market. *Energy Policy*, **36**(8), 3026–3034.

- KRISTIANSEN, T. 2003. Utilizing MATPOWER in Optimal Power Flow. *MODELING IDENTIFICATION AND CONTROL*, **24**(1), 49–59.
- LI, H., SUN, J., & TESFATSION, L. 2008. Dynamic LMP Response Under Alternative Price-Cap and Price-Sensitive Demand Scenarios. Aug.
- MARQUES, P., & TRIGO, P. 2008. Sistema Multi-Agente aplicado ao Mercado Eléctrico. *In: Quartas Jornadas de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores, 2008*.
- MARTIN, D., CHEYER, A., & MORAN, D. 1999. The Open Agent Architecture: A Framework for Building Distributed Software Systems. *Applied Artificial Intelligence*, **13**(1-2), 91–128. OAA.
- NORTH, M., CONZELMANN, G., KORITAROV, V., MACAL, C., THIMMAPURAM, P., & VESELKA, T. 2002. E-Laboratories: Agent-Based Modeling of Electricity Markets. *In: American Power Conference 2002, Chicago, IL (US), 04/15/2002–04/17/2002*.
- NORTH, M., TATARA, E., COLLIER, N., & OZIK, J. 2007. Visual Agent-based Model Development with Repast Symphony. *Conference on Complex Interaction and Social Emergence, Transmission and Distribution, Proceedings of the Agent 2007 Conference on*, November.
- OMEL. 2006. *Resolución de 24 de mayo de 2006, de la Secretaría General de Energía, por la que se aprueban las Reglas de funcionamiento del mercado diario e intradiario de producción de energía eléctrica (BOE 30 de mayo de 2006)*.
- OMEL. 2007. *Mercado de Electricidad 2007*.
- PAVÓN, J., & GÓMEZ-SANZ, J. 2003. Agent Oriented Software Engineering with INGENIAS. vol. 2691. Prague, Czech Republic: Springer-Verlag.
- PINTO, M. 2001. *A study on the deregulation of the electricity sector and the implications for the Portuguese Market*. Ph.D. thesis, Instituto Superior Técnico.
- PRAÇA, I., RAMOS, C., VALE, Z., & CORDEIRO, M. 2003a. A new agent-based framework for the simulation of electricity markets. *Pages 469–473 of: Intelligent Agent Technology, 2003. IAT 2003. IEEE/WIC International Conference on*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society.

- PRAÇA, I., RAMOS, C., VALE, Z., & CORDEIRO, M. 2003b. MASCEM: A Multi-agent System That Simulates Competitive Electricity Markets. *IEEE INTELLIGENT SYSTEMS*, **18**(6), 54–60.
- PRAÇA, I., VIAMONTE, M., VALE, Z., & RAMOS, C. 2008. Agent-based simulation of electronic marketplaces with decision support. *Pages 3–7 of: SAC '08: Proceedings of the 2008 ACM symposium on Applied computing*. New York, NY, USA: ACM.
- PRAÇA, I., RAMOS, C., & VALE, Z. 2001. Competitive electricity markets: simulation to improve decision making. *In: Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto*, vol. 1.
- RODRÍGUEZ-ELIAS, O., MARTÍNEZ-GARCÍA, A., VIZCAÍNO, A., FAVELA, J., & PIATTINI, M. 2005. Developing a Multi-Agent Knowledge Management System with INGENIAS.
- RUSSELL, S.J., NORVIG, P., CANNY, J.F., MALIK, J., & EDWARDS, D.D. 1995. *Artificial intelligence: a modern approach*. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.
- SENSFUSS, F., RAGWITZ, M., GENOESE, M., & MÖST, D. 2007. Agent-Based Simulation of Electricity Markets: A Literature Review. *Working Paper Sustainability and Innovation*.
- SHANNON, R., & JOHANNES, J. 1976. Systems Simulation: The Art and Science. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, **6**(10), 723–724.
- SOUSA, J. 2005 (Maio). *Integração de mercados liberalizados de energia eléctrica com aplicações ao MIBEL*. Ph.D. thesis, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Economia.
- SOUSA, J., & LAGARTO, J. 2007. How market players adjusted their strategic behaviour taking into account the CO<sub>2</sub> emission costs - An application to the spanish electricity market . *In: European Electricity Market, 2007. EEM 2007. 4th International Conference on*.
- SUN, J., & TEFATSION, L. 2007a. DC optimal power flow formulation and solution using QuadProgJ. *Economics Working Paper*.
- SUN, J., & TEFATSION, L. 2007b. Dynamic Testing of Wholesale Power Market Designs: An Open-Source Agent-Based Framework. *Computational Economics*, **30**(3), 291–327.

- SUTTON, R.S., & BARTO, A.G. 1998. *Reinforcement Learning: An Introduction*. MIT Press.
- THIMMAPURAM, P., VESELKA, T.D., KORITAROV, V., VILELA, S., PEREIRA, R., & SILVA, R.F. 2008. Modeling hydro power plants in deregulated electricity markets: Integration and application of EMCAS and VALORAGUA. *European Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International Conference on*, May, 1–6.
- TRIGO, P., & MARQUES, P. 2008. The electricity market as a multi-agent system. *Pages 1–6 of: European Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International Conference on*.
- VAN DINTHER, C. 2007. *Adaptive Bidding in Single-Sided Auctions under Uncertainty: An Agent-based Approach in Market Engineering (Whitestein Series in Software Agent Technologies and Autonomic Computing)*. Birkhäuser Basel.
- VESELKA, T., BOYD, G., CONZELMANN, G., KORITAROV, V., MACAL, C., NORTH, M., SCHOEPFLE, B., & THIMMAPURAM, P. 2002 (October). Simulating the Behavior of Electricity Markets With an Agent-Based Methodology: the Electricity Market Complex Adaptive System (EMCAS) Model. *In: Proceedings of the 22 ndInternational Association for Energy Economics International Conference, Vancouver, British Columbia, Canada*.
- WALKINS, C., & DAYAN, P. 1992. Q-learning. *Machine Learn*, **8**, 279–292.
- WEIDLICH, A., & VEIT, D. 2008. A Critical Survey of Agent-Based Wholesale Electricity Market Models. *Energy Economics, in press*.
- WOOLDRIDGE, M., & JENNINGS, N.R. 1995. Intelligent agents: theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, **10**(2), 115–152.
- ZIMMERMAN, R. 2001. POWERWEB 2.7. *Power Systems Engineering Research Center (PSEERC)*.
- ZIMMERMAN, R.D., THOMAS, R.J., GAN, D., & MURILLO-SÁNCHEZ, C. 1999. A web-based platform for experimental investigation of electric power auctions. *Decision Support Systems*, **24**(3-4), 193–205.