

Universidade de Trás-os-Montes
e
Alto Douro
Departamento de Engenharias
Área de Engenharia Electrotécnica e de Computadores



Sistema Multi-Agente para Apoio à Negociação
em Mercados de Electricidade

Isabel Cecília Correia da Silva Praça Gomes Pereira

Tese submetida à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
Para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores,
elaborada sob a orientação do
Doutor Carlos Fernando da Silva Ramos
e do
Doutor Manuel da Ressurreição Cordeiro

Vila Real, Novembro de 2004

Para o João,

e

Para o Paulo

Agradecimentos

Em primeiro lugar um agradecimento muito especial ao meu orientador, Doutor Carlos Ramos, pela total disponibilidade, por todo o apoio, colaboração, e valiosos contributos científicos.

Ao meu co-orientador, Doutor Manuel Cordeiro, um agradecimento por todo o apoio e disponibilidade com que acompanhou este trabalho.

À Dr^a Zita Vale agradeço o esforço desenvolvido na leitura e revisão de alguns capítulos deste trabalho, e que tanto contribuíram para o seu enriquecimento.

À minha colega Maria João Viamonte, que se encontrava na mesma altura em processo de desenvolvimento do seu Doutoramento, um agradecimento especial pela troca de ideias e pela partilha de angústias, dúvidas e incertezas.

Agradeço a todos os meus colegas do Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão (GECAD) pelas discussões científicas e pelo ambiente agradável que sempre proporcionaram.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, agradeço a dispensa do serviço docente. À Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, agradeço a oportunidade de realizar este trabalho. Ao PRODEP agradeço o suporte dado a este Doutoramento. Agradeço, ainda, à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo suporte concedido ao GECAD e a alguns projectos de I&D, nomeadamente ao projecto GOMEC-Gestão Optimizada no Mercado de Electricidade Competitivo.

Agradeço a todos os meus amigos pelo apoio que directa ou indirectamente me deram no decorrer deste trabalho. Obrigada por também me ajudarem a descontrair e enfrentar as dificuldades com mais leveza!

À minha família um agradecimento muito especial. Aos meus Pais, a quem devo tudo o que sou hoje, aos meus sogros, por todo o apoio, à minha irmã, cunhada, cunhados e queridos sobrinhos: Obrigada, por serem a melhor família do MUNDO!

Ao Paulo, por tudo! Especialmente por estar sempre presente, por me saber compreender (e aturar...) e por me ajudar a fazer de cada dia um dia melhor!

Por fim, ao meu querido filho João, um agradecimento mais do que especial, para quem, com o seu lindo sorriso, me mostra que a vida é sempre bela, mesmo nos momentos mais difíceis!

Resumo

Neste trabalho aplicou-se a tecnologia dos Sistemas Multi-Agente ao estudo de Mercados Competitivos de Electricidade, incidindo no desenvolvimento de protocolos e estratégias de negociação, bem como na análise de cenários para apoio à tomada de decisões.

Nos últimos anos, os Mercados de Energia Eléctrica têm sofrido, um processo de reestruturação em que se procura promover a competitividade no sector. Neste âmbito surgiram novas entidades e a forma como as entidades se relacionavam foi substancialmente alterada. Com o aumento da competitividade surgem novas opções de negócio, surgindo diversos modelos de mercado, assentes em diferentes mecanismos de negociação. Novas regras ditam novos comportamentos, obrigando as entidades do sector a um esforço de adaptação de modo a manterem a sua competitividade. A análise do mercado, da sua evolução e de diferentes comportamentos por parte das diversas entidades, torna-se um factor chave.

As entidades presentes nestes mercados estão naturalmente distribuídas, são independentes e heterogéneas, cada uma possui os seus objectivos e actua de forma autónoma no sentido de os atingir e interagem entre si no meio onde se encontram.

Todas estas características motivaram o desenvolvimento do MASCEM – “Multi Agent Simulator of Competitive Electricity Markets”.

O MASCEM é um Simulador Multi-Agente que permite estudar vários modelos de Mercados de Energia Eléctrica e diversos comportamentos por parte das entidades participantes. Foram definidos os protocolos de negociação para o mercado *spot* de electricidade, funcionando como um modelo em Bolsa, em Contratos Bilaterais e em modelo Misto. O comportamento das entidades de mercado é baseado em estratégias dinâmicas para definição de preços.

Desenvolveu-se, ainda, um Algoritmo de Análise de Cenários, que permite estruturar a informação recolhida pelos agentes ao longo do processo de negociação e analisá-la sob várias perspectivas, estabelecendo as opções de negócio e permitindo a sua análise através da aplicação de critérios de decisão baseados em Teoria de Jogos.

Com este simulador foram já realizadas várias experiências que permitiram tirar diversas conclusões sobre o trabalho desenvolvido e apontar linhas de acção futuras.

Abstract

This thesis reports our work on applying Multi-Agent Systems technology to study Competitive Electricity Markets, focusing essentially on the development of negotiation protocols and strategies, and on agents' decision-making based on the analysis of previewed market scenarios.

The electricity industry is experiencing major changes in the structure of its markets and regulations, evolving into a distributed industry in which market forces drive electricity's price. This industry is becoming competitive; a market environment is replacing the traditional centralized-operation approach. New entities have emerged and the role of existing ones has changed. There are different market rules, based on different negotiation mechanisms. In this context, new modelling approaches that simulate how electric power markets might evolve over time and how market participants might react to the changing environment are welcome.

Electricity market entities are heterogeneous and autonomous, have their own objectives and follow their business strategies in order to reach them; they interact among them in a dynamically changing environment.

All these characteristics led us to develop MASCEM – Multi-Agent Simulator of Competitive Electricity Markets, and give electricity market entities a tool to support their decisions and to obtain knowledge about market behaviour and evolution.

With MASCEM different market models and behaviours are simulated. Negotiation protocols for spot market based on a Pool, Bilateral Contracts and Hybrid model were defined. Agents' behaviour is based on dynamic strategies, dependent on time and behaviour, in order to adjust price during and between negotiation periods.

A Scenario Analysis Algorithm is proposed. This algorithm provides a more complex support to develop and implement dynamic pricing strategies since each agent analyses and develops a strategic bid, for the next period, taking into account not only their previous results but also other players results and expected future reactions. The algorithm is based on analysing several bids under different scenarios, and applying a decision method, based on Game Theory, to select the bid to propose.

Several experiences have been made, leading us to achieve some conclusions and define future developments.

Conteúdo

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
Conteúdo	xiii
Lista de Figuras	xix
Lista de Tabelas	xxiii
Lista de Abreviaturas	xxv
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	2
1.2 Objectivos	3
1.3 Contribuições Científicas	5
1.4 Impacto Científico do MASCEM	7
1.5 Estrutura da Dissertação	8
2. Mercados de Energia Eléctrica	11
Introdução	12
2.1 Estrutura e Operação do Mercado	13
2.1.1 Entidades de Mercado	14
2.1.1.1 Operador de Sistema	14
2.1.1.2 Operador de Mercado	15
2.1.1.3 Outros Participantes no Mercado	16
2.1.2 Tipos de Mercado	18

2.1.3 Modelos de Mercado	19
2.1.3.1 Modelo em Bolsa	20
2.1.3.2 Modelo de Contratos Bilaterais.....	23
2.1.3.3 Modelo Misto.....	24
2.2 Abordagens à Liberalização do Mercado	25
2.2.1 Inglaterra e País de Gales	26
2.2.2 Países Nórdicos.....	28
2.2.3 Espanha	30
2.3 Evolução do Mercado Eléctrico em Portugal	32
2.3.1 Estrutura do Sector Eléctrico.....	33
2.3.2 Mercado Ibérico de Electricidade e Energia	36
2.4 Conclusões.....	39
3. Sistemas Multi-Agente	41
Introdução.....	42
3.1 Agentes	42
3.1.1 Características.....	43
3.1.2 Agentes e Objectos.....	44
3.1.3 Tipos de Agentes.....	45
3.1.4 Arquitecturas de Agentes	46
3.1.4.1 Arquitectura Deliberativa	47
3.1.4.2 Arquitectura Reactiva.....	48
3.1.4.3 Arquitectura Híbrida	49
3.2 Sistemas Multi-Agente	50
3.2.1 Cooperação, Competição e Coordenação entre Agentes	51
3.2.2 Linguagens de Comunicação entre Agentes	53
3.2.3 Ontologia	55
3.2.4 Plataformas de Desenvolvimento de Agentes	56
3.3 Negociação	62
3.3.1 Caracterização	63

Conteúdo	xv
3.3.2 Mecanismos.....	67
3.3.2.1 Leilões.....	67
3.3.2.2 Redes de Contrato.....	70
3.3.2.3 Teoria de Jogos	71
3.3.2.4 Aproximações Heurísticas	72
3.3.2.5 Argumentação.....	72
3.3.3 Táticas e Estratégias de Negociação	73
3.3.3.1 Táticas.....	73
3.3.3.2 Estratégias.....	75
3.4 Conclusões.....	77
4. Sistemas Multi-Agente Aplicados a Mercados de Energia Eléctrica	79
Introdução.....	80
4.1 Requisitos e Desafios	81
4.2 Apoio à Decisão no Estudo dos Mercados de Electricidade	84
4.2.1 Sistemas Multi-Agente.....	85
4.2.1.1 Mercado de Energia Eléctrica	88
4.2.1.2 Simulação Baseada em Agentes	88
4.3 Simuladores Multi-Agente de Mercados de Electricidade	89
4.3.1 Auction Market Simulator.....	90
4.3.2 Auction Agents for the Electric Power Industry	91
4.3.3 Simulator for Electric Power Industry Agents.....	94
4.3.4 PowerWeb.....	96
4.3.5 Electric Market Complex Adaptive Systems	99
4.3.6 Outros Trabalhos.....	101
4.3.7 Comparação entre os Simuladores.....	103
4.4 Conclusões.....	103
5. MASCEM: Modelo Proposto	105
Introdução.....	106
5.1 Características	107

5.2	Arquitetura do Simulador MASCEM	107
5.2.1	Modelo Multi-Agente.....	108
5.2.1.1	Agentes	108
5.2.1.2	Descrição formal	110
5.2.1.3	Ontologia dos bens do mercado.....	110
5.2.2	Agente Vendedor e Comprador.....	112
5.2.2.1	Estrutura	112
5.2.3	Agente Comercializador	117
5.2.4	Interacção entre os Agentes	120
5.2.4.1	Modelo em Bolsa.....	120
5.2.4.2	Modelo de Contratos Bilaterais.....	123
5.2.4.3	Modelo Misto.....	127
5.3	Conclusões.....	128
6.	MASCEM: Comportamento dos Agentes – Estratégias Dinâmicas	
	e Análise de Cenários	131
	Introdução.....	132
6.1	Comportamento dos Agentes.....	133
6.1.1	Caracterização dos Agentes	134
6.1.1.1	Agente Vendedor	134
6.1.1.2	Agente Comprador	137
6.1.2	Estratégias Dinâmicas	141
6.1.2.1	Durante um Período de Negociação	141
6.1.2.2	Entre Períodos de Negociação.....	142
6.1.3	Algoritmo de Análise de Cenários.....	145
6.1.3.1	Definição de “Jogadas”	146
6.1.3.2	Tomada de Decisão	151
6.1.3.3	Actualização de Cenários	152
6.2	Comparação com trabalhos relacionados	153
6.3	Conclusões.....	155

7. MASCEM: Implementação e Análise Experimental	157
Introdução.....	158
7.1 Implementação.....	159
7.1.1 Plataforma de Comunicação	162
7.2 Análise Experimental	162
7.2.1 Definição de Cenários e Análise de Resultados	163
7.2.2 Casos de Estudo – Estratégias	164
7.2.2.1 Cenário de Monopólio.....	164
7.2.2.2 Cenário de Competição entre Vendedores.....	170
7.2.3 Casos de Estudo – Algoritmo de Análise de Cenários	174
7.2.3.1 Cenário	174
7.2.3.2 Exemplo.....	175
7.2.4 Casos de Estudo – Duração das Simulações	178
7.3 Conclusões.....	179
8. Conclusões	181
8.1 Síntese e Conclusão do Trabalho Desenvolvido	182
8.2 Limitações e Desenvolvimento Futuro	185
Referências	191

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Mercado Assimétrico.....	21
Figura 2.2 – Mercado Simétrico	22
Figura 2.3 – Modelo Misto	24
Figura 2.4 – Sequência de Operações no Mercado de Energia Eléctrica Espanhol.....	32
Figura 2.5 – Organização do Sistema Eléctrico Nacional.....	34
Figura 3.1 – Um Agente e o seu ambiente.....	43
Figura 3.2 – Tipologia de Agentes baseada na proposta de Nwana	46
Figura 3.3 – Arquitectura Deliberativa.....	47
Figura 3.4 – Arquitectura Reactiva	48
Figura 3.5 – Arquitectura Híbrida.....	49
Figura 3.6 – Protocolo de Rede de Contrato	52
Figura 3.7 – Estrutura de um Sistema OAA.....	59
Figura 4.1 – Estrutura dos Agentes, que representam Companhias Produtoras, no sistema SEPIA	96
Figura 5.1 – Modelo Multi-Agente do MASCEM.....	108
Figura 5.2 – Descrição parcial do bem “Energia Eléctrica”	111
Figura 5.3 – Estrutura dos Agentes Vendedores e Compradores.....	112
Figura 5.4 – Estrutura do Agente Comercializador.....	117
Figura 5.5 – Interacção entre Agente Comercializador e seus possíveis	

Cientes.....	118
Figura 5.6 – Protocolo de Negociação para o Modelo em Bolsa.....	121
Figura 5.7 – Protocolo de Negociação para Contratos Bilaterais.....	124
Figura 5.8 – Decisões a tomar em Modelos Mistos.....	128
Figura 6.1 – Situação em que não ainda há acordo entre os Agentes.....	140
Figura 6.2 – Situação em que é possível chegar a acordo entre os Agentes	140
Figura 6.3 – Algoritmo de Análise de Cenários.....	145
Figura 6.4 – Cenário de Mercado.....	147
Figura 6.5 – Aproximação das Licitações aos preços propostos pelos outros Agentes	148
Figura 6.6 – Matriz resultado da análise de “Jogadas”.....	151
Figura 6.7 – Utilização do critério MaxiMin.....	151
Figura 6.8 – Utilização do critério MiniMax.....	152
Figura 7.1 – Interface OAA do MASCEM.....	159
Figura 7.2 – Interface OAA para visualização das mensagens trocadas entre os Agentes.....	160
Figura 7.3 – Ecrã principal para manuseamento de Cenários.....	161
Figura 7.4 – Ecrã de definição de um Cenário	161
Figura 7.5 – Ecrã para entrada de informação sobre um Agente Comprador.....	161
Figura 7.6 – Preço do Mercado em Bolsa	166
Figura 7.7 – Preço de Mercado com Compradores sem comportamento estratégico.....	167

Figura 7.8 – Preço de Mercado com Compradores com estratégia CGD	167
Figura 7.9 – Preço de Mercado com Compradores com estratégia ADF	167
Figura 7.10 – Preço de Mercado com Agente Vendedor com estratégia CGD	168
Figura 7.11 – Preço de Mercado com Agente Vendedor com estratégia ADF	168
Figura 7.12 – Preço de compra, por unidade, face a variações do comportamento dos Compradores	169
Figura 7.13 – Percentagem da procura satisfeita face a variações do comportamento dos Compradores	169
Figura 7.14 – Preço de Mercado com Vendedores com estratégia CGD	170
Figura 7.15 – Preço de Mercado com Vendedores com estratégia ADF	170
Figura 7.16 – Resultados dos Agentes Vendedores	171
Figura 7.17 – Resultados com Compradores sem comportamento estratégico.....	172
Figura 7.18 – Mercado Assimétrico com Vendedores ligeiramente diferentes	173
Figura 7.19 – Mercado Simétrico com Vendedores ligeiramente diferentes	173
Figura 7.20 Curvas da Oferta e da Procura no Mercado Simétrico	175

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Comparação entre os Simuladores apresentados	103
Tabela 6.1 – Comparação entre o MASCEM e trabalhos relacionados	154
Tabela 7.1 – Dados dos Agentes Vendedores	174
Tabela 7.2 – Dados dos Agentes Compradores.....	174
Tabela 7.3 – Mercado Assimétrico: Resultados relativamente ao lucro obtido por V1 quando não recorre ao AAC	176
Tabela 7.4 – Mercado Simétrico: Resultados relativamente ao lucro obtido por V1 quando não recorre ao AAC	177

Lista de Abreviaturas

AAC	Algoritmo de Análise de Cenários
AAEPI	<i>“Auction Agents for the Electric Power Industry”</i>
ACL	<i>“Agent Communication Language”</i>
ADF	<i>“Adapted Derivative Following”</i>
AMR	<i>“Agent Message Router”</i>
AMS	<i>“Auction Market Simulator”</i>
ARCHON	<i>“ARchitecture for Cooperative Heterogeneous ON_line systems”</i>
BDI	<i>“Belief-Desire-Intention”</i>
CAE’s	Contratos de Aquisição de Energia
CGD	<i>“Composed Goal Directed”</i>
CNE	<i>“Comisión Nacional de Energía”</i>
COM	<i>“Component Object Model”</i>
EDP	Energias de Portugal
E-Mail	<i>“Electronic Mail “</i>
EMCAS	<i>“Electric Market Complex Adaptive Systems”</i>
EPRI	<i>“Electric Power Research Institute”</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
FERC	<i>“Federal Energy Regulatory Comission”</i>
FIPA	<i>“Foundation for Intelligent Physical Agents”</i>
FTP	<i>“File Transfer Protocol “</i>
HTTP	<i>“Hyper Text Transfer Protocol”</i>
ICL	<i>“Interagent Communication Language”</i>
I&D	Investigação e Desenvolvimento
IEEE	<i>“Institute of Electrical and Electronic Engineers”</i>
JATLite	<i>“Java Agent Template, Lite“</i>

KIF	<i>“Knowledge Interchange Format”</i>
KQML	<i>“Knowledge Query Manipulation Language”</i>
MASCEM	<i>“Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Marktes”</i>
MaxOS	Max Operador de Sistema
MIBEL	Mercado Ibérico de Electricidade e Energia
MinOS	Min Operador de Sistema
NETA	<i>“New Electricity Trading Arrangements”</i>
OAA	<i>“Open Agent Architecture “</i>
OFGEM	<i>“Office of Gas and Electricity Marktes”</i>
OIS	Operador Independente do Sistema
OMEL	<i>“Operador del Mercado de Electricidad”</i>
OMI	Operador de Mercado Ibérico
PDA	<i>“Personal Digital Assistant”</i>
PX	<i>“Power Exchange”</i>
RECs	<i>“Regional Electricity Companies”</i>
REN	Rede Eléctrica Nacional, S.A.
RNT	Rede Nacional de Transporte
SEI	Sistema Eléctrico Independente
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SENV	Sistema Eléctrico Não Vinculado
SEP	Sistema Eléctrico de Serviço Público
SEPIA	<i>“Simulator for the Electric Power Industry Agents”</i>
SMART	<i>“Spot Market Agent Research Tool”</i>
TCP/IP	<i>“Transport Control Protocol/Internet Protocol”</i>
WWW	<i>“World Wide Web ”</i>

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo pretende fornecer uma visão global do trabalho desenvolvido e descrito na presente dissertação. Após um breve enquadramento do tema abordado, onde se apresentam e justificam os paradigmas utilizados, são descritos os objectivos e principais contribuições científicas. É também analisado o impacto científico do trabalho efectuado. Por fim, será referida a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento

O tema abordado nesta dissertação refere a aplicação de Sistemas Multi-Agente ao estudo e simulação de mercados, incidindo essencialmente no desenvolvimento de estratégias de negociação e algoritmos de apoio à tomada de decisão das várias entidades envolvidas, de modo a que estas se adaptem às regras de mercado e se mantenham competitivas.

O comportamento de um conjunto de entidades mais ou menos inteligentes e mais ou menos organizadas de acordo com leis do tipo social pode ser modelado através de um Sistema Multi-Agente. Os agentes dispõem de uma certa autonomia e estão imersos num ambiente com o qual necessitam de interagir, pelo que devem possuir uma representação parcial deste ambiente e meios de percepção e comunicação. O estudo de métodos e técnicas de desenvolvimento para Sistemas Multi-Agente insere-se no domínio de investigação da Inteligência Artificial Distribuída. Em particular, a área de investigação associada aos Sistemas Multi-Agente a que este trabalho dedica maior ênfase é à interacção entre agentes autónomos e heterogéneos.

O domínio de aplicação seleccionado foi o dos Mercados Competitivos de Energia Eléctrica, por ser uma área de estudo muito actual e oportuna, para a qual a tecnologia dos Agentes se revela bastante adequada.

Um pouco por todo o mundo, o sector eléctrico tem vindo a sofrer profundas transformações, passando de um sector tradicionalmente verticalizado a uma estrutura horizontal em que se promove a concorrência ao nível da produção e comercialização de energia, sendo o transporte uma área que se mantém mais ou menos monopolizada, condicionado pelas características particulares dos sistemas de energia eléctrica que o diferencia de outras áreas.

Com a reestruturação, o relacionamento comercial entre produtores, distribuidores e consumidores altera-se significativamente. Surgem novas entidades, tipos e modelos de mercado. Tal mudança é também notória em Portugal.

Em diversos países, tem-se assistido à experimentação de diferentes configurações de mercados de energia eléctrica. Se há configurações que de facto promovem a competitividade, há também outras que se revelaram ineficazes. Neste contexto, ferramentas que permitam analisar a evolução do mercado, testar novas regras e até modelos de mercado, antes de estes serem colocados em prática, revelam-se instrumentos de extrema importância.

Com a reestruturação, o mercado torna-se mais aberto e competitivo, mas também mais complexo, colocando aos intervenientes novos desafios. As estratégias de negócio terão que ser repensadas. Nesse contexto, é muito útil a utilização de ferramentas que permitam a análise e teste de cenários e estratégias de negócio alternativas.

O Mercado Eléctrico é um mercado distribuído, em que as entidades produtoras de energia eléctrica e os seus consumidores finais estão naturalmente distribuídos, e em que cada uma tem os seus objectivos e comportamentos. Um Agente é uma entidade autónoma, que possui objectivos próprios, podendo deste modo representar um participante no mercado eléctrico. É também uma entidade com capacidade de comunicar e, como tal, capaz de dialogar com os outros participantes no mercado. Um Agente é ainda uma entidade racional, logo capaz de negociar, com base nos seus objectivos. A representação de cada uma das entidades do mercado através de um agente, que detem conhecimento sobre o mercado e estratégias de actuação, permitirá definir uma comunidade de agentes concorrentes, capazes de competir e cooperar, simulando o comportamento do mercado e permitindo a sua análise dinâmica.

Neste trabalho propõe-se um Sistema Multi-Agente destinado essencialmente a modelar as transacções comerciais que ocorrem em mercados competitivos. O sistema serve de base ao desenvolvimento de uma ferramenta de simulação multi-agente, cujo objectivo principal é o apoio à decisão às entidades intervenientes em mercados competitivos, em particular nos Mercados Eléctricos, no sentido de poderem adquirir conhecimento sobre as regras de funcionamento e a evolução do mercado e de poderem testar estratégias alternativas para se manterem competitivas. O sistema foi especificado por forma a ser facilmente estendido de modo a poder contemplar outros aspectos inerentes aos mercados eléctricos como, por exemplo, a análise de trânsito de potência nas redes de transporte.

Sendo assim, esta dissertação apresenta o modelo multi-agente especificado e o simulador MASCEM – Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets (Simulador Multi-Agente para Mercados Competitivos de Energia Eléctrica), implementado com base nessa especificação. O MASCEM permite simular diferentes modelos de mercados eléctricos, de modo a ser útil em diferentes abordagens à liberalização do mercado.

1.2 Objectivos

O processo de reestruturação do sector eléctrico coloca diversos desafios exigindo a alteração dos modelos conceptuais que têm dominado o funcionamento deste sector. As perspectivas de negócio foram substancialmente alteradas, passando-se de uma situação

monopolista para um mercado aberto e competitivo, do qual emergem novas oportunidades mas também novos problemas. Com a crescente complexidade e imprevisibilidade do mercado, torna-se cada vez mais difícil o suporte à tomada de decisões no sector. Sendo assim, torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas, que permitam aos intervenientes do sector eléctrico analisar continuamente o mercado na procura da melhor estratégia de negócio, torna-se uma necessidade.

Na perspectiva das entidades dedicadas à geração de energia eléctrica, com o aumento da competitividade, surge a necessidade de analisar o mercado na procura de novas e melhores estratégias de negociação. No contexto actual, a estratégia de negócio terá que ter em conta não só a procura prevista, mas também o comportamento das entidades concorrentes, comportamento esse muito difícil de prever. A este nível, uma ferramenta que implemente um modelo do mercado com várias entidades, com diferentes comportamentos, que possa ser utilizado para testar acções alternativas, antes destas serem postas em prática, será, sem dúvida, uma mais valia.

Por outro lado, face à liberalização do sector, os compradores de energia vêem agora surgir a possibilidade de estabelecer novos negócios, com diferentes entidades produtoras, a diferentes preços, com diferentes quantidades e restrições temporais, tendo necessidade de avaliar todas estas novas variáveis e alternativas, antes de tomar qualquer decisão.

Com a liberalização do mercado passam a existir mais mecanismos de suporte ao estabelecimento de negócios em mercados eléctricos. Sendo assim, quer aos produtores quer aos consumidores de energia eléctrica, surge a necessidade de avaliar quais os benefícios de cada tipo de mecanismo, bem como qual a melhor estratégia a utilizar em cada um deles e que política de negócio é mais conveniente.

As entidades responsáveis pela regulamentação do sector eléctrico têm também muitas vantagens a tirar de uma ferramenta de análise do mercado. Nomeadamente no que diz respeito à análise do impacto das suas decisões a nível de estabelecimento de tarifários e regras que definam as transacções e tipo de contratos a estabelecer entre entidades que compram e vendem energia.

Neste trabalho pretende-se tirar partido das potencialidades dos Sistemas Multi-Agente numa perspectiva de criar uma ferramenta de estudo de Mercados Eléctricos Competitivos.

Propõe-se um ambiente de simulação multi-agente cujo objectivo é permitir o apoio à tomada de decisões às diferentes entidades do sector eléctrico, permitindo-lhes testar e analisar vários mecanismos de mercado, avaliando as suas políticas actuais de intervenção, e testando novas políticas, simulando um mercado que poderá ser totalmente parametrizado pelos utilizadores da plataforma. Neste ambiente, as diferentes entidades do mercado são representadas por agentes heterogéneos, cada qual com os

seus objectivos e estratégias de decisão, que interagem, podendo estabelecer diferentes tipos de contratos e analisar a evolução do mercado.

A ênfase deste trabalho foi colocada no estudo da negociação entre agentes, representativos das várias entidades dos mercados eléctricos, na definição de protocolos de negociação, estratégias dinâmicas e no desenvolvimento de algoritmos de apoio à tomada de decisão dos agentes.

A plataforma MASCEM, desenvolvida e apresentada nesta dissertação, implementa o ambiente proposto, permitindo estudar o mercado *spot* de transacção de energia eléctrica, dividido em 24 períodos de negociação, relativos às 24 horas do dia seguinte. O MASCEM permite testar e demonstrar vários processos de negociação automática entre agentes, com diversas estratégias e algoritmos de análise do mercado.

A flexibilidade e abrangência, bem como as características estratégicas e de decisão dos agentes do MASCEM, tornam-no numa ferramenta útil no contexto da reestruturação dos mercados eléctricos.

1.3 Contribuições Científicas

O trabalho desenvolvido contribui estabelecendo uma base de simulação sólida, que permite o estudo de vários modelos de mercados eléctricos e a obtenção de conclusões extrapoláveis à realidade.

Não tendo a pretensão de fornecer uma solução definitiva, pretende contribuir com uma pequena parcela de conhecimento que possibilite algum avanço científico nas áreas em estudo, nomeadamente na definição de protocolos e estratégias de negociação entre agentes, no apoio à tomada de decisão e na simulação e análise de mercados eléctricos competitivos.

As principais contribuições e originalidades do presente trabalho são a seguir enunciadas:

- *Definição e especificação de um sistema de simulação multi-agente apropriado, incluindo os agentes representativos das entidades presentes em mercados eléctricos competitivos.* Os agentes presentes no modelo representam as entidades habitualmente encontradas em mercados eléctricos, desde os produtores e consumidores de energia eléctrica, às entidades responsáveis pela operacionalidade do sistema eléctrico, como os operadores da rede de transporte;
- *O modelo inclui entidades surgidas no âmbito da reestruturação do mercado eléctrico.* Um factor importante é a inclusão no modelo de entidades surgidas

recentemente no âmbito das várias transformações que o sector tem sofrido, tal como os Comercializadores de energia eléctrica;

- *Definição de diferentes protocolos de negociação.* Foram definidos diferentes protocolos de negociação entre os agentes, tendo em conta vários mecanismos de negociação que é usual encontrar em mercados de energia eléctrica competitivos. Assim, definiram-se os protocolos para negociações em Bolsa, Contratos Bilaterais e Mercados Mistos. Tal característica assume particular relevância na medida em que não há ainda consenso sobre qual a melhor maneira de organizar o mercado de energia eléctrica de modo a que promova a igualdade de oportunidades e livre concorrência. O desenvolvimento de ferramentas que permitam analisar mais do que um tipo de negociação revela-se assim uma mais valia para as entidades participantes pois permite-lhes estudar as diferenças entre eles e definir a melhor forma de actuar em cada um, ao mesmo tempo que permite às entidades responsáveis analisar a evolução futura de mercados baseados em determinado tipo de mecanismo de negociação, podendo antecipar e evitar a concretização de modelos que à partida se revelam ineficientes;
- *Especificação e desenvolvimento de estratégias de negociação.* Foram especificadas e desenvolvidas estratégias para definição de preços durante e entre períodos de negociação. As estratégias para definição de preços durante um período de negociação são dependentes do tempo, enquanto que as estratégias para definição de preços entre períodos de negociação são dependentes do comportamento;
- *Comportamento de Agentes Compradores baseado em estratégias dinâmicas.* De facto, não só os agentes que representam a oferta, Agentes Vendedores, mas também aqueles que representam a procura, Agentes Compradores, recorrem a estratégias dinâmicas para definição do preço a propor no estabelecimento de contratos, quer em Bolsa quer em processos de negociação Bilateral. Trata-se de um aspecto fundamental, uma vez que com o aumento da competitividade no sector os compradores de energia eléctrica passam a ter a possibilidade de seleccionar o seu fornecedor de energia eléctrica, pelo que faz todo o sentido que recorram a estratégias que os auxiliem na definição dos preços a propor nas negociações. Por outro lado, este é um aspecto que não é usual encontrar nas ferramentas de apoio ao estudo de mercados eléctricos, tal como é detalhado na secção 4.3;
- *Análise de cenários para apoio à decisão.* É apresentado um procedimento para análise da informação que vai sendo recolhida pelos agentes ao longo das negociações em que participam. Desse procedimento faz parte um Algoritmo de

Análise de Cenários, construídos com base nas pretensões do agente e no conhecimento que detém sobre o mercado e os outros agentes presentes no mercado. O algoritmo faz a análise de vários cenários face a várias licitações possíveis e aplica um método baseado em Teoria de Jogos para sugerir ao agente a opção a tomar;

- *Desenvolvimento de um protótipo.* O sistema MASCEM - Simulador Multi-Agente para Mercados Competitivos de Energia Eléctrica, implementa e concretiza as especificações feitas. O MASCEM é o resultado prático mais visível deste trabalho: uma plataforma de simulação, que permite o estudo de vários modelos de mercados eléctricos, com vários agentes dotados de comportamento baseado em estratégias dinâmicas e análise de cenários.

Nesta secção apresentou-se resumidamente o trabalho efectuado, realçando os aspectos em que contribui para o avanço do conhecimento nas áreas que aborda. Este trabalho será detalhado nos próximos capítulos.

1.4 Impacto Científico do MASCEM

Recentemente, a revista de Inteligência Artificial do IEEE, a IEEE Intelligent Systems, editou um número especial dedicado ao tema Agentes e Mercados (volume 18, nº 6 de Novembro/Dezembro de 2003). Nesse número especial foram apresentados 6 dos trabalhos que melhor ilustravam a aplicação dos agentes aos mercados. Os trabalhos em causa eram os seguintes:

- Um sistema desenvolvido na University of Hebrew e na University of Massachusetts, reportando o uso de agentes intermediários no Comércio Electrónico [Yarom et al., 2003];
- Um simulador de mercados financeiros desenvolvido na University of Pennsylvania [Kearns e Ortiz, 2003];
- Um sistema desenvolvido em conjunto pelo Massachusetts Institute of Technology, a University of Electro-Communications e o New England Complex Systems Institute, que abordava os protocolos de negociação para contratos complexos [Klein et al., 2003];
- Um trabalho conjunto entre a University of Southampton e a University of Harvard, relativo às regras que governam a interacção entre agentes [Dash et al., 2003];
- Um sistema que simula a oferta de agentes em leilões para obtenção de vôos, reservas de hotel e bilhetes de atracções para os clientes de agências de

viagens, trabalho esse desenvolvido na University of Michigan [Wellman et al., 2003];

- O Sistema MASCEM, desenvolvido pela autora da presente Tese de Doutoramento, um sistema que simula os Mercados Competitivos de Energia Eléctrica com base num Sistema Multi-Agente [Praça, et al., 2003b] e que foi desenvolvido no Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto e na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

É de referir que a aplicação da tecnologia dos Agentes aos Mercados tem tido um impacto significativo na actividade de I&D desenvolvida nos últimos anos, sobretudo nos Estados Unidos da América (o MASCEM foi o único sistema 100% europeu presente no número especial da IEEE Intelligent Systems).

Para além do impacto na área da Inteligência Artificial e Agentes Inteligentes, o MASCEM tem sido bem aceite em revistas e conferências científicas da área de Simulação [Praça, et al., 2001a] [Praça et al., 2004a] e de Sistemas de Energia [Praça, et al., 2001b] [Praça, et al., 2003a]. Por exemplo, o artigo [Praça, et al., 2003a] foi apresentado em conjunto com mais de 100 artigos na “Intelligent Systems Applications to Power Systems – ISAP 2003”, a principal conferência mundial de sistemas inteligentes aplicados a sistemas de energia. De todos esses trabalhos foram seleccionados doze para um número especial do “Engineering Intelligent Systems Journal”, tendo o trabalho referido sido seleccionado [Praça et al., 2004b].

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta secção apresenta a estrutura e organização da dissertação, sendo apresentado um resumo do conteúdo de cada capítulo, de modo a fornecer uma noção breve e geral do trabalho desenvolvido e apresentado ao longo da mesma. Assim, serão de seguida, descritos resumidamente os sete capítulos que se seguem a este capítulo de introdução.

Constituindo os Mercados Competitivos de Energia Eléctrica o domínio de aplicação seleccionado, esta dissertação começa por apresentar, no capítulo 2, os principais desenvolvimentos nesta área. Analisa-se a estrutura deste tipo de mercados, nomeadamente no que diz respeito às entidades participantes, tipos e modelos de mercado, bem como à abordagem de alguns países europeus à reestruturação do sector. A evolução do sector em Portugal é também descrita.

No capítulo 3 é feito o estudo das características e técnicas relacionadas com os Sistemas Multi-Agente, área de investigação a que esta dissertação se dedica. São analisadas diversas formas de interacção entre Agentes, dando-se especial destaque à

Negociação, descrevendo-se alguns dos seus mecanismos, bem como estratégias e táticas de negociação. Algumas plataformas de suporte ao desenvolvimento de Sistemas Multi-Agente são também descritas, nomeadamente a plataforma que serviu de suporte ao desenvolvimento do nosso sistema, a Open Agent Architecture.

A aplicabilidade dos Sistemas Multi-Agente ao domínio dos Mercados Competitivos de Energia Eléctrica é feita no capítulo 4. Neste capítulo começa-se por analisar os requisitos e desafios que enfrentam as entidades dos Mercados Eléctricos no contexto das recentes transformações no sector, no sentido de aumentar a competitividade. Em seguida analisa-se de que forma os Sistemas Multi-Agente e, em particular, a Simulação Multi-Agente são adequados ao estudo destes mercados e como podem trazer mais valias no apoio à decisão às entidades que nele participam. A finalizar, descrevem-se e comparam-se alguns trabalhos desenvolvidos neste âmbito.

Os capítulos 5 e 6 descrevem em pormenor o sistema MASCEM – Simulador Multi-Agente para Mercados Competitivos de Energia Eléctrica, por nós proposto e desenvolvido. Assim, no capítulo 5 é descrito o modelo multi-agente e os protocolos de negociação entre os agentes. À estrutura dos Agentes Vendedores e Compradores é dedicada especial atenção, por serem os principais intervenientes no processo de negociação. Os vários tipos de negociação incluídos no simulador são descritos detalhadamente, especificando-se todo o protocolo e troca de mensagens entre os agentes.

O capítulo 6 descreve as estratégias dinâmicas e um algoritmo para análise de cenários, que sustentam o comportamento dos agentes. Assim, descrevem-se as estratégias que os agentes podem utilizar durante e entre períodos de negociação, e o Algoritmo de Análise de Cenários. Este algoritmo analisa a informação recolhida pelo agente ao longo do processo de negociação, construindo com base nessa informação cenários que são posteriormente analisados face a várias opções de negociação que o agente pode tomar, permitindo-lhe antever alguns resultados e suportar a decisão na opção a seleccionar.

No capítulo 7 são descritos e analisados alguns exemplos, com o principal objectivo de ilustrar as capacidades e mais valias do simulador. Os exemplos apresentados baseiam-se em cenários simples de modo a que facilmente se possam analisar e compreender os resultados.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões do trabalho efectuado e descrito ao longo desta dissertação. Apresentam-se as suas contribuições, indicando também algumas das suas limitações. São ainda apresentados os desenvolvimentos futuros com vista a ultrapassar as limitações referidas e a estender o modelo de modo a ser mais abrangente quer no domínio dos Mercados Eléctricos quer nos Mercados Competitivos em geral.

Capítulo 2

Mercados de Energia Eléctrica

O tema principal desta Tese é a Simulação de Mercados com base numa abordagem Multi-Agente. O domínio de aplicação são os Mercados de Energia Eléctrica, área muito interessante e adequada à exploração do sistema por nós desenvolvido. Assim, torna-se importante desde já explorar um pouco esse domínio.

O Sector Eléctrico tem sofrido nos últimos anos uma forte reestruturação, envolvendo a adopção de mecanismos de mercado, visando uma maior liberdade na escolha dos fornecedores de energia eléctrica. Neste capítulo abordam-se as principais mudanças e suas consequências na estrutura e organização dos Mercado de Energia Eléctrica. Apresenta-se também a situação vivida em alguns países europeus, dando especial destaque a Portugal.

Introdução

O tema principal desta Tese é a Simulação de Mercados com base numa abordagem Multi-Agente [Praça, et al., 2003b]. Contudo, a escolha de um domínio de aplicação, suficientemente actual e oportuno, é fundamental para a concretização das propostas da presente Tese. Os Mercados de Energia Eléctrica surgem assim como um domínio de teste muito adequado. Note-se que nesses mercados os intervenientes, ou entidades envolvidas, recebem por vezes a designação de Agentes, o que parece indicar a adequação da tecnologia dos Agentes na simulação de tais mercados. Uma melhor sedimentação dos conhecimentos desse domínio torna-se importante antes de avançarmos para os capítulos seguintes.

O sector da energia eléctrica tem sofrido processos de reestruturação tendo-se verificado em diversos países, mudanças significativas de natureza estrutural e regulamentar.

Desde a década de oitenta do século XX, que diversos sectores de actividade têm vindo a ser sujeitos a um processo de reestruturação que tem sido acompanhado, em muitos casos, por processos de privatização. A tradicional forma de organizar a produção, o transporte, a distribuição e a comercialização de energia eléctrica, geralmente monopolista e integrando verticalmente todas estas áreas, tem vindo a alterar-se gradualmente, através de um processo de desverticalização. Neste processo de transformação, as tradicionais empresas do sector passaram a subdividir-se em diversas empresas, aparecendo empresas que actuam na área da produção, do transporte ou da distribuição de energia. Esta subdivisão dá ao mercado da energia eléctrica uma natureza horizontal, em oposição à sua tradicional verticalidade, em que os consumidores estavam impossibilitados de seleccionar o seu fornecedor de energia eléctrica.

Tais mudanças apontam no sentido do estabelecimento de um mercado competitivo, baseado nas leis da oferta e da procura, em que as empresas produtoras de energia eléctrica passam a ser encaradas como fornecedoras de um serviço que deverá possuir uma elevada qualidade. Os principais objectivos apontados ao estabelecer um mercado de energia eléctrica são: assegurar a segurança na operacionalidade de todo o sistema, assegurar o fornecimento de um serviço de qualidade, aumentar a eficiência e, por outro lado, promover a economia de mercado, com a perspectiva de reduzir o custo da energia eléctrica [Concordia, 1999].

Este processo de reestruturação corresponde a uma das maiores alterações que sofreu a actividade neste sector, caracterizada pelo facto de existirem muitos e novos participantes no sector, exigindo novos tipos de relacionamentos, e por existirem novos

problemas, de índole técnica e comercial, que um funcionamento do tipo monopolista não implicava.

Apesar das novas regras do sector aproximarem este tipo de mercado de outros mercados competitivos, as particularidades inerentes ao tipo de produto, nomeadamente no que diz respeito à impossibilidade de armazenamento de quantidades significativas de energia eléctrica, levam à necessidade de garantir o equilíbrio entre a potência produzida e consumida em cada instante, traz dificuldades acrescidas [Philipson e Willis, 1999].

Todo este processo tem originado uma profunda reestruturação do sector eléctrico e das entidades que nele participam. Apesar da diversidade de modelos adoptados em diferentes países, há um conjunto de entidades comuns e de modelos que têm vindo a prevalecer em detrimento de outros. Neste capítulo iremos abordar as características estruturais dos mercados competitivos de energia eléctrica, descrevendo as principais entidades que nele participam e os modelos de mercado mais usuais. A evolução do mercado de energia eléctrica de alguns países europeus será também descrita, sendo dada particular atenção à evolução do sector no nosso País, que culmina com a implementação do Mercado Ibérico de Electricidade e Energia em conjunto com a vizinha Espanha.

2.1 Estrutura e Operação do Mercado

A reestruturação do sector eléctrico tem vindo a convergir no sentido da desintegração vertical e da promoção da lei da oferta e da procura. No entanto, esta reestruturação tem que atender às características específicas das respectivas actividades.

A criação de condições concorrenciais para o sector e a criação de um mercado de energia eléctrica fizeram com que a actividade de transporte e distribuição fosse separada da produção e da comercialização. Enquanto que as actividades de produção e comercialização de electricidade se podem desenvolver em ambiente competitivo, havendo mesmo argumentos fundamentados para uma maior eficiência económica, as características particulares dos sistemas de energia eléctrica, nomeadamente as relacionadas com o transporte e distribuição da electricidade, são condicionados por leis físicas que o diferenciam de outros negócios de comercialização de bens e serviços. De facto, ao nível do transporte e distribuição, as redes acabam por se converter em monopólios naturais por razões relacionadas, essencialmente, com a inviabilidade económica da multiplicação de redes eléctricas na mesma área geográfica, com restrições de ordem ambiental e com a possibilidade de obter economias de escala, que em ambiente concorrencial não seriam atingidas, sendo estas actividades encaradas como um serviço a

ser prestado às entidades que actuam no mercado (produtores, comercializadores e consumidores), que deverá ser adequadamente remunerado e regulado.

A reestruturação do sector, integrando áreas em que existe competição e áreas em que não existe competição, conduz, assim, à necessidade de estabelecimento de mecanismos explícitos de regulação, conduzidos por entidades com marcadas características de independência, por forma a suscitar a desejada confiança nos agentes que actuam no mercado e criar um quadro regulamentar estável e equilibrado.

Assim, têm vindo a ser criadas em diversos países, entidades reguladoras, responsáveis por estabelecer regras para o exercício das actividades do sector eléctrico, tentando garantir que as condições desse exercício permitam obter uma maior eficiência na afectação dos recursos e a não discriminação no relacionamento entre as entidades que actuam no sector. Em Portugal surgiu assim a Entidade Reguladora do Sector Eléctrico, actualmente designada por Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos [ERSE, URL], de que voltaremos a falar mais à frente, quando se caracterizar o sector eléctrico Português. Em seguida, caracterizam-se as entidades intervenientes nos mercados de energia eléctrica.

2.1.1 Entidades de Mercado

A reestruturação do sector eléctrico alterou o papel das entidades do tradicional sistema verticalizado e criou novas entidades que actuam nos mercados de energia eléctrica. Diferentes países adoptaram modelos distintos para os seus mercados, tendo resultado em estruturas de mercado diferentes. No entanto, há um conjunto de entidades comuns a esses modelos, ainda que, por vezes, sob designações diferentes.

Tais entidades podem ser categorizadas em entidades responsáveis pela coordenação e regulação independente, surgindo assim o Operador do Sistema e o Operador de Mercado, e em participantes no mercado, que vão desde as companhias produtoras aos consumidores finais [Shahidehpour et al., 2002] [Vale, 2003].

2.1.1.1 Operador de Sistema

Esta entidade é a responsável por administrar o transporte, manter a segurança do sistema eléctrico, escalonamento e planificação das operações. O Operador de Sistema deve funcionar independente de qualquer outra entidade participante no mercado, devendo-se garantir um acesso não discriminatório a todos os utilizadores do sistema de transporte.

Esta entidade tem funções de coordenação técnica da operação da rede de transporte. Para tal necessita de informação relativa aos Contratos Bilaterais estabelecidos, nomeadamente os nós de injeção e absorção e as potências envolvidas, bem como

informação sobre as propostas aceites no âmbito dos mercados organizados em Bolsa. Com base nessa informação, analisa a viabilidade técnica para cada período do dia seguinte, prestando particular atenção às situações de congestionamento.

O Operador de Sistema detém autoridade para gerir os recursos do sistema e para cortar cargas de forma a manter a segurança do sistema, ou seja, é responsável por remover violações no transporte, equilibrar a oferta e a procura e manter aceitável a frequência do sistema.

Existem duas estruturas possíveis para o Operador de Sistema, estando a sua escolha dependente dos objectivos e autoridade pretendida. Uma das estruturas é, habitualmente, designada por Min Operador de Sistema (MinOS). Neste caso, a autoridade do Operador de Sistema é modesta, centrando a sua actividade em manter a segurança do sistema de transporte, não tendo qualquer papel no mercado.

A segunda estrutura, habitualmente designada de Max Operador de Sistema (MaxOS) inclui uma *Power Exchange* (PX). A PX é uma estrutura independente, não governamental e sem fins lucrativos, que assegura um mercado competitivo ao executar um leilão para negociação de energia eléctrica, funcionando no fundo como uma espécie de Bolsa de energia (ver secção 2.1.3). Em algumas estruturas de mercado, o responsável pela PX é uma entidade separada do Operador de Sistema, embora que por vezes façam parte da mesma organização.

Como já foi referido, nem todos os países adoptaram a mesma estrutura para os seus mercados, daí que por vezes surjam algumas diferenças relativamente às entidades e funções que desempenham.

2.1.1.2 Operador de Mercado

Nos mercados organizados em Bolsa, o Operador de Mercado é a entidade responsável pelo funcionamento da Bolsa de energia eléctrica. É ele quem supervisiona o funcionamento da Bolsa, recebe as propostas de compra e venda, e define o preço da electricidade e as propostas aceites em cada período de negociação.

Por vezes, encontra-se agregado ao Operador de Sistema, caso do MaxOS, tal como se referiu na secção anterior. De qualquer forma, mesmo sendo uma entidade independente do Operador de Sistema, terá que com ele comunicar, no sentido de as propostas aceites serem analisadas e ser verificada a viabilidade técnica de injectar e absorver da rede as quantidades propostas. Se não se verificarem situações de congestionamento, então as propostas serão aceites e implementadas no período a que dizem respeito. Caso se verifique algum congestionamento, os Operadores de Sistema e Mercado interagem, de modo a evitar essa situação, o que pode levar à activação de mercados de ajustes ou alteração das propostas aceites, com base em critérios transparentes e bem definidos.

Na secção 2.1.3 descrevem-se alguns modelos de mercado, pormenorizando-se então, um pouco mais, as actividades do Operador de Mercado.

2.1.1.3 Outros Participantes no Mercado

Além dos operadores já referidos, existem ainda vários participantes no mercado, desde companhias produtoras a consumidores de energia eléctrica. Algumas dessas entidades, nomeadamente as que se dedicam sobretudo à comercialização de energia eléctrica, surgiram no âmbito da reestruturação do sector.

Nesta secção descrevem-se as entidades que estão habitualmente presentes nos mercados eléctricos reestruturados.

Companhias Produtoras de Electricidade

São as companhias que detêm centrais produtoras de electricidade, ou que as representam no mercado. Estas companhias vendem electricidade às entidades com as quais estabeleceram directamente contratos, ou vendem electricidade através de mercados organizados em Bolsa. As Companhias Produtoras de Electricidade podem também transaccionar serviços de sistema.

Estas entidades devem garantir igualdade de tratamento a todos os outros participantes do mercado, sem haver qualquer tipo de discriminação, e não devem fixar preços ou usar Contratos Bilaterais para exercer poder de mercado.

As companhias produtoras têm como objectivo maximizar os seus lucros. Para tal podem optar por participar nos vários tipos de mercados e tomar as suas decisões estratégicas com base nos riscos que estão dispostas a correr.

Empresas de Transporte

Cabe-lhes o papel de construir, em caso de necessidade, gerir, manter e operar o sistema de transporte, sistema crucial nos mercados de energia eléctrica, assegurando a sua fiabilidade e segurança. Estas entidades transmitem a electricidade através de redes de muito alta tensão, desde os centros produtores até à sua entrega às empresas distribuidoras. A utilização da rede de transporte é controlada pelo Operador de Sistema, de forma a garantir tratamento não discriminatório no acesso às redes, nas ligações e nos custos, por parte de todos os participantes no mercado.

Empresas de Distribuição

Entidades que estão incumbidas da operação, manutenção, expansão e segurança da rede de distribuição aos clientes finais.

Retalhistas

São entidades que surgiram com a liberalização do mercado, e que têm licença legal para vender electricidade a retalho. Estas entidades compram energia eléctrica e outros serviços, que podem ser combinados em pacotes com determinadas características, e

vendem-nos directamente aos consumidores finais ou indirectamente através dos Agregadores.

Agregador

É uma entidade que agrega um grupo de consumidores. Agrupando-se, os consumidores podem vir a usufruir de melhores condições, nomeadamente preços mais baixos, uma vez que necessitam de maiores quantidades de energia eléctrica e podem dotar-se de meios, mais ou menos elaborados, para gerir as suas ofertas e as suas curvas de consumo.

O Agregador pode exercer a sua actividade como um intermediário entre os clientes e os Retalhistas. Quando compra energia para depois a revender aos seus clientes, está, no fundo, a actuar como Retalhista e deve, por isso, ter licença para tal.

As empresas de produção, nomeadamente as de pequena dimensão e as que utilizam fontes de energia renováveis, podem ter também vantagens em agruparem-se em entidades agregadoras de produtores.

Corrector

É uma entidade que actua no mercado como intermediário. Esta entidade não produz, não compra e não vende electricidade, apenas facilita as transacções entre vendedores e compradores.

Comercializador

É uma entidade que compra e vende energia eléctrica mas não dispõe de meios de produção de energia eléctrica. Dispõe de licença para transaccionar serviços de electricidade no mercado, podendo actuar tanto no mercado grossista como no mercado retalhista.

Consumidores

Os consumidores estão ligados à rede de distribuição em Baixa Tensão, no caso de serem pequenos consumidores, e directamente à rede de distribuição em Média ou Alta Tensão, ou ainda à rede de transporte, quando se trata de consumidores com potências elevadas ou grandes consumidores com necessidades especiais, como é o caso de certos clientes industriais, da área química ou siderúrgica.

Num mercado de energia liberalizado os consumidores não estão obrigados a comprar a energia a uma determinada entidade, tendo a possibilidade de estabelecer contratos com qualquer fornecedor de electricidade que actue nesse mercado. Os consumidores podem, por exemplo, utilizar a elasticidade das suas cargas para optar por um fornecedor que lhes ofereça preços mais baixos, deslocando as suas cargas para fora das horas de ponta de consumo, podendo também escolher o pacote de serviços (tendo em conta, por exemplo, o nível de fiabilidade) que mais lhes convém.

Inicialmente apenas os consumidores elegíveis, entendendo-se este conceito como estando associado a um valor mínimo de potência instalada ou a um consumo mínimo anual de energia eléctrica, podiam comprar energia eléctrica no mercado ou através de Contratos Bilaterais. O limite de elegibilidade imposto inicialmente destina-se fundamentalmente a garantir uma mais gradual e segura transição do ambiente tradicional para o ambiente de mercado. Esses limites vão sendo gradualmente reduzidos à medida que os mercados se desenvolvem e se vai ganhando experiência nesta nova forma de funcionamento do sector.

2.1.2 Tipos de Mercado

Os mercados podem ser classificados de acordo com o tipo de bem em transacção ou de acordo com o tempo [Shahidehpour et al., 2002]. Tendo em conta o tipo de bem em transacção o mercado pode ser de:

- Mercado de Energia: onde a energia eléctrica é transaccionada entre vendedores e compradores, através de um mecanismo centralizado, funcionando como uma Bolsa, e/ou através de contratos estabelecidos directamente entre vendedores e compradores;
- Mercado de Serviços de sistema: onde se transaccionam serviços de sistema, necessários para que o funcionamento do sistema eléctrico se faça com padrões adequados de qualidade, segurança e fiabilidade. Tais serviços incluem a regulação de frequência, reserva girante, reserva suplementar, reserva parada, regulação de tensão e a reposição do sistema após perturbação [Pereira, 2003]. Os serviços de sistema podem ser transaccionados de forma sequencial, sendo considerada uma ordem de qualidade para os vários serviços que são tratados de acordo com essa ordem, ou de forma simultânea;
- Mercado de Transmissão: onde se transaccionam direitos de transmissão, que podem ser direitos de transmitir, injectar ou absorver potência. O detentor de direitos de transmissão pode exercer esses direitos ou vendê-los a terceiros. Estes direitos são particularmente importantes em situações de congestionamento da rede. Os direitos são transaccionados através de um leilão, em que os participantes fazem as suas licitações de compra e venda.

Considerando a dimensão temporal dos mercados, estes podem ser classificados em:

- Mercado *spot*: é um mercado que funciona numa base diária e que tem como objectivo negociar energia para cada hora ou meia hora do dia seguinte (também designado na literatura de língua inglesa como *day-ahead market*);

- Mercado de ajuste: designado na literatura de língua inglesa como *imbalance market*, este tipo de mercado tem como objectivo eliminar os desequilíbrios existentes entre a oferta e a procura (uma vez que os valores reais podem diferir dos previstos), funcionando normalmente em períodos que podem ir de 10 a 5 minutos antes da entrega física da energia. Neste mercado, o Operador de Sistema, intervém activamente na compra/venda da energia, com o objectivo de manter o sistema em equilíbrio;
- Mercado de derivados: onde se transaccionam contratos de futuros e de opções, que no fundo são instrumentos financeiros destinados a minimizar o risco dos mercados a curto prazo [Azevedo, 2003a];
- Mercado de planeamento: em [Sheblé, 1999] propõe ainda um mercado de planeamento, associado ao investimento a longo prazo, nomeadamente em infra-estruturas de produção, transporte e distribuição.

Este trabalho dedica-se apenas ao estudo do mercado de energia, e sua análise através do desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão com base num simulador multi-agente, pelo que é a esse tipo de mercado que nos referiremos daqui em diante.

Poder de Mercado

O poder de mercado pode ser definido como a capacidade de influenciar o preço ou a disponibilidade de energia eléctrica, ou de conseguir excluir competidores, durante um certo período de tempo, de forma a melhorar o lucro e afastar o preço de valores competitivos [Stoft, 2002].

O poder de mercado impede a competição e a escolha dos consumidores. Pode ser exercido de forma intencional, por exemplo, através de ofertas de produção de energia mais cara que o necessário, ou exercido de forma acidental, por exemplo, devido a restrições na rede que limitem a capacidade de transporte numa dada área.

Cabe às entidades reguladoras assegurar o bom funcionamento do mercado em termos de competitividade.

2.1.3 Modelos de Mercado

Têm sido considerados vários modelos para a estrutura do mercado, sendo três os modelos básicos a considerar: Modelo em Bolsa, Modelo de Contratos Bilaterais e Modelo Misto [Shahidehpour et al., 2002].

2.1.3.1 Modelo em Bolsa

Uma das formas de relacionamento entre empresas produtoras, por um lado, e comercializadores ou clientes elegíveis, por outro, corresponde aos mercados organizados em Bolsa.

No Modelo em Bolsa existe uma entidade central, designada habitualmente como Operador de Mercado, que supervisiona o funcionamento do mercado e define o preço da energia eléctrica.

Uma *Pool* pode assumir a forma de uma organização mais complexa que se distingue de uma Bolsa de energia eléctrica “pura” pelo maior grau de integração dos mercados de energia, de transmissão e de serviços de sistema, podendo contemplar a optimização centralizada do despacho dos grupos geradores com base em considerações operacionais – não apenas a produção de energia, mas também a disponibilidade de reserva, requisitos mínimos de produção, tempos de arranque, etc.

Este tipo de mercados funciona normalmente no dia anterior àquele em que será implementado o resultado das propostas de compra/venda que tiverem sido aceites. Assim, na língua inglesa estes mercados são também conhecidos como *Day-ahead Markets* ou Mercados *Spot* de energia eléctrica. Este tipo de mercados tem de ser estruturado de forma a considerar as flutuações diárias de carga e o funcionamento de unidades produtoras com custos diferenciados. Assim, um dia é normalmente dividido em 24 ou 48 intervalos de negociação, referentes respectivamente a períodos de 1 hora ou de 30 minutos. As entidades que actuam no mercado deverão apresentar, para cada um desses intervalos, as suas propostas de venda e/ou compra, indicando: o preço a que pretendem vender ou comprar e a energia pretendida (para venda ou compra). No final da negociação serão obtidos 24 ou 48 despachos para cada hora, ou meia hora, do dia seguinte.

Os despachos deverão então ser comunicados ao Operador de Sistema, que procederá à análise da sua viabilidade técnica, tendo em conta as restrições de natureza técnica da rede eléctrica. Se não ocorrerem situações de congestionamento os despachos são viáveis e serão implementados no dia seguinte. Se, por outro lado, houver congestionamentos, o Operador de Sistema e o Operador de Mercado interagem de modo a eliminar essas situações.

Neste modelo as entidades vendedoras competem para fornecer energia à rede e não para a fornecer a clientes específicos, com os riscos que tal implicaria.

O Operador de Mercado é responsável pelo despacho económico e por definir o preço de mercado. A forma mais usual para estabelecer o preço de mercado é recorrer a um mecanismo de leilão uniforme, aplicado às ofertas de venda e de compra, através do qual é determinado o preço que equilibra a oferta e a procura.

Mercado Assimétrico

Neste tipo de mercado, a Bolsa está estruturada de forma a permitir apenas a apresentação de propostas de venda de energia eléctrica. Nos Mercados Assimétricos os compradores não colocam licitações de compra, apenas é feita uma estimativa da procura.

Este modelo assume que a procura se encontra apta a pagar qualquer preço que resulte do funcionamento do mercado, ou seja, a procura não é elástica.

O mecanismo de definição do preço que é habitual encontrar neste tipo de mercados é um mecanismo baseado num leilão de propostas secretas em que a última proposta a ser aceite é a que define o preço de mercado, preço uniforme, pago a todas as entidades vendedoras cujas ofertas forem aceites.

Nos Mercados Assimétricos, o Operador de Mercado recebe todas as ofertas de venda, ordena-as por ordem crescente de preço pretendido e aceita todas as ofertas necessárias à total satisfação da procura. O preço que irá ser pago, a todos os vendedores cujas ofertas foram aceites, é o preço da oferta de venda mais cara que foi necessário aceitar para satisfazer a procura. A figura 2.1 ilustra este processo.

Neste tipo de mercado os preços são muito influenciados pelos preços de venda oferecidos, pelo nível da procura e pela ocorrência ou não de saídas de serviço.

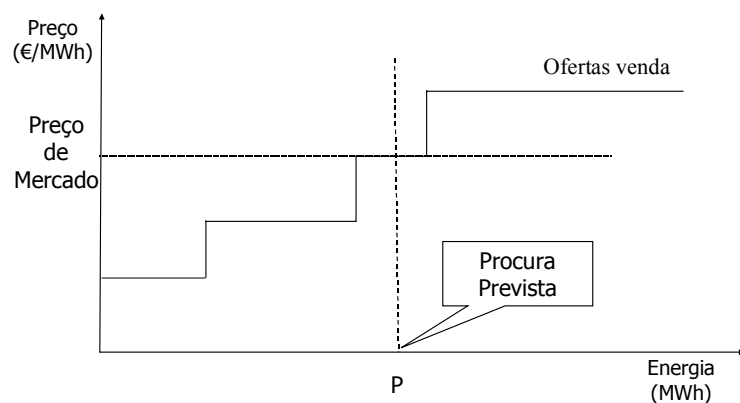


Figura 2.1: Mercado Assimétrico.

Mercado Simétrico

Quando existe competição, quer por parte das entidades vendedoras quer por parte das entidades compradoras, o mercado designa-se por Mercado Simétrico e o mecanismo de definição de preço habitualmente empregue assenta num Leilão Duplo.

As entidades participantes no mercado deverão transmitir ao Operador de Mercado as suas ofertas, que deverão incluir, entre outros, a informação seguinte:

- Ofertas de Venda: nó de injeção na rede, disponibilidade de produção para o período de negociação em questão e o preço a que pretendem ser remunerados;
- Ofertas de Compra: nó de absorção na rede, quantidade de energia eléctrica pretendida para o período de negociação em questão e o preço que estão dispostos a pagar.

Neste mercado, relativamente a cada período de negociação em causa, habitualmente 1 hora ou 30 minutos, o Operador de Mercado recebe as ofertas de venda e ordena-as por ordem crescente de preço, desde a que apresenta preço mais baixo até à de preço mais elevado. Recebe ainda as propostas de compra, ordenando-as por ordem decrescente, desde a que oferece preço mais alto até à que oferece preço mais baixo, estabelecendo assim as curvas da oferta e da procura. A intersecção destas curvas irá determinar o preço de fecho do mercado e a respectiva quantidade de energia negociada.

Na figura 2.2 ilustra-se este processo, sendo que as ofertas de compra e venda situadas à direita da quantidade negociada não são aceites.

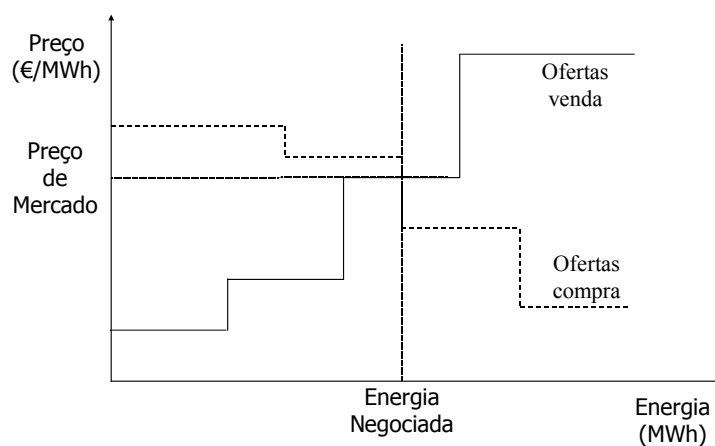


Figura 2.2: Mercado Simétrico.

O facto de os compradores fazerem as suas ofertas de compra traduz a existência de consumos cujo comportamento é sensível ao preço da energia eléctrica, isto é, cujo comportamento apresenta elasticidade relativamente ao preço.

De notar que as ofertas de compra e venda podem ser simples ou complexas. As ofertas simples não admitem interacção temporal entre as ofertas transmitidas por uma mesma entidade, ou seja, a oferta apresentada para um intervalo de tempo é independente das que se possam apresentar para intervalos de tempo posteriores ou anteriores. O processo de análise das ofertas pode então ser decomposto em 24 ou 48

problemas independentes, conforme se considerem períodos de uma hora ou 30 minutos, respectivamente.

No entanto, por vezes existem condições particulares que obrigam à apresentação de ofertas complexas, que podem estar associadas à existência de valores mínimos de produção, gradientes de arranque e paragem, indivisibilidade de uma oferta (por exemplo no caso de centrais térmicas com elevado custo de arranque), tempo mínimo de escalonamento (por exemplo, no caso de uma central térmica ser escalonada deve permanecer em serviço durante um determinado tempo mínimo), entre outros.

O funcionamento de um mercado deste tipo será tanto mais eficiente quantos mais agentes actuarem no mercado e quanto menos concertação existir na preparação das respectivas propostas.

A participação nos mercados em Bolsa pode ser obrigatória, significando que todas as entidades produtoras e consumidoras, ou comercializadoras, terão que obrigatoriamente apresentar propostas de compra e venda na Bolsa, ou pode ser voluntária, significando neste caso que as entidades produtoras e consumidoras, ou comercializadoras, poderão apresentar as suas propostas à Bolsa ou estabelecer relacionamentos directos entre si através de mecanismos denominados Contratos Bilaterais.

2.1.3.2 Modelo de Contratos Bilaterais

Neste tipo de mercado as transacções são feitas directamente entre o vendedor e o comprador, com preços, termos e condições negociados livremente e especificados num contrato entre as duas partes. Contudo, há sempre a necessidade de verificar se há capacidade de transporte suficiente para assegurar a transacção e se a segurança do sistema eléctrico não é posta em causa, pelo que todos os Contratos Bilaterais têm que ser comunicados à entidade responsável pelo sistema eléctrico, ou seja, ao Operador de Sistema.

O Operador de Sistema deverá assegurar a viabilidade técnica do conjunto de contratos estabelecidos, interessando-lhe informações de natureza técnica, como a quantidade de energia eléctrica, e nós de injeção e consumo da potência a transaccionar. O Operador de Sistema não tem, no entanto, qualquer necessidade de conhecer o preço da energia previsto nesses contratos.

Este modelo de mercado é bastante flexível; no entanto, o elevado custo de negociação e estabelecimento dos contratos e o risco de crédito são algumas desvantagens que apresenta.

Para além dos Contratos Bilaterais físicos, que afectam a exploração do sector eléctrico, existem contratos de índole puramente financeira, destinados a lidar com o risco

decorrente dos mercados a curto prazo. São os contratos de futuros e de opções [Azevedo, 2003a] [Azevedo, 2003b].

Nos contratos às diferenças, a entidade produtora e a entidade consumidora chegam a acordo estabelecendo um preço alvo. As diferenças que surgirem entre esse preço alvo e o preço de mercado são compensadas, ou por parte da entidade produtora, nos intervalos de tempo em que o preço de mercado for superior ao preço alvo, ou por parte da entidade consumidora, nos intervalos de tempo em que o preço de mercado for inferior ao preço alvo, estabilizando-se deste modo as remunerações no preço alvo. Nos contratos de futuros as entidades contratantes reservam o direito de utilização de energia eléctrica a um determinado preço com um determinado horizonte temporal. As opções permitem que as entidades contratantes possam utilizar ou não os recursos reservados, oferecendo por isso menor risco, já que podem ser desactivadas para aproveitamento de situações mais interessantes que possam entretanto surgir.

No âmbito deste trabalho apenas nos iremos centrar no estabelecimento de Contratos Bilaterais físicos.

2.1.3.3 Modelo Misto

Este modelo combina várias características do Modelo em Bolsa e do Modelo de Contratos Bilaterais.

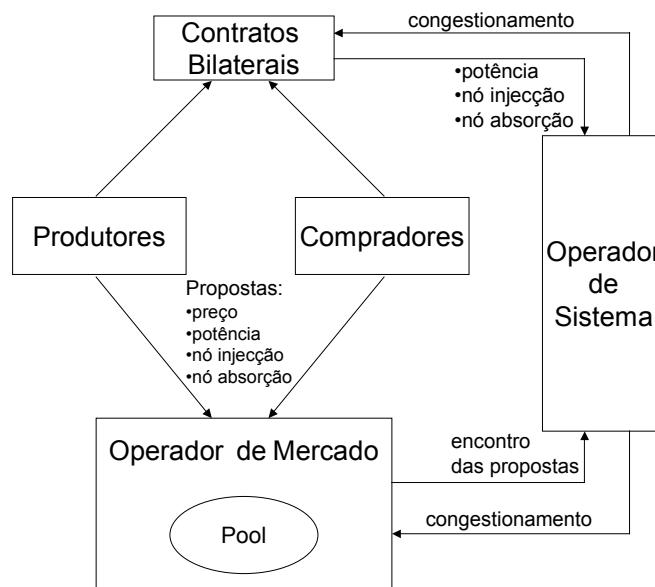


Figura 2.3: Modelo Misto.

Num modelo misto a utilização da Bolsa não é obrigatória, podendo os consumidores transaccionar directamente com produtores ou, por outro lado, optar por negociar na Bolsa aceitando o preço de mercado estabelecido. A figura 2.3 apresenta de forma

esquemática o modelo genérico de exploração do sector eléctrico, quando organizado sob a forma de um Modelo Misto.

Neste modelo, o facto de se dar aos consumidores a flexibilidade de transaccionar na Bolsa ou de seleccionar directamente o fornecedor pretendido aumenta de forma significativa o seu poder de escolha, além de servir de ímpeto à criação de novos serviços e fornecer opções de preço que melhor se ajustam às necessidades individuais dos consumidores.

A generalidade dos países onde ocorreu, ou onde está em curso, a reestruturação do sector eléctrico, tem optado por estruturas mistas. Por exemplo, existem estruturas mistas em Espanha e na Noruega e Suécia, sendo a destes dois últimos países no âmbito do Nord Pool.

Ao estabelecerem Contratos Bilaterais, as entidades intervenientes têm que enviar a informação relativa ao contrato, nomeadamente a potência a transaccionar e os nós de injeção e absorção, ao Operador de Sistema. Por seu lado, uma vez estabelecido o despacho económico da Bolsa, resultante do encontro de propostas de compra e venda, o Operador de Mercado envia também essa informação ao Operador de Sistema. Toda esta informação, relativa às solicitações de utilização da rede, permite avaliar a possibilidade de existência de congestionamentos, tendo em conta as restrições de capacidade de transporte das redes. Se porventura existirem situações de congestionamento, o Operador de Sistema remete essa informação aos intervenientes, podendo ainda activar mercados de ajustes, recebendo propostas de incrementos ou decrementos de potência, tendo em vista ultrapassar essas situações.

2.2 Abordagens à Liberalização do Mercado

Nos Estados Unidos, dada a dimensão do país e sua divisão em vários estados, o processo de reestruturação teve um desenvolvimento não uniforme, existindo uma grande diversidade de estruturas, sistemas tarifários e condições de acesso às redes. As primeiras iniciativas neste sentido começaram em estados como a Califórnia, Massachusetts, Rhode Island, New York, Pennsylvania, Maine e New Jersey, em simultâneo com a definição de regulamentos e regras de mercado pela *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC).

A competição a nível de retalho foi introduzida em 1998 nos estados de Massachusetts, Rhode Island e Califórnia, alargando-se a doze estados até ao final do ano 2000. Após o arranque inicial, o processo sofreu um abrandamento por volta do ano 2000.

Aspectos como a crise eléctrica na Califórnia [Joskow, 2001], a falência da Enron, a volatilidade dos preços de mercado, o aumento dos preços em alguns estados, o *blackout* de 2003, entre outros [Joskow, 2004] contribuem para que alguns estados questionem a vantagem deste tipo de reformas ou prefiram aguardar pela demonstração de que tais reformas trarão benefícios reais aos consumidores.

No entanto, a maioria dos estados a Nordeste, alguns estados do centro Leste, o estado do Texas e a FERC continuam a reestruturação do mercado no sentido de o fazer funcionar bem. Em 2003 Paul Joskow fez uma análise do que correu bem e mal no processo de reestruturação dos E.U.A., realçando-se as lições a retirar dessa experiência [Joskow, 2003].

Também no continente europeu são já várias as experiências de reestruturação do sector eléctrico. Nesta secção abordam-se algumas dessas experiências.

Começa-se por falar do mercado de Inglaterra e País de Gales, por terem sido os países europeus pioneiros na reforma do sector eléctrico e por constituir um interessante caso de estudo uma vez que o seu mercado já passou por reformas, atendendo aos resultados inesperados que se foram verificando.

Dadas as suas características, de mercado multinacional, o mercado eléctrico dos Países Nórdicos, Nord Pool, é também alvo de descrição.

O processo de reestruturação do mercado Espanhol, por ser o país vizinho, com o qual actualmente se desenrola o processo de criação e concretização do Mercado Ibérico de Electricidade e Energia, é também analisado.

Por fim, descreve-se a evolução do sector em Portugal, fazendo-se a abordagem ao Mercado Ibérico de Electricidade e Energia.

2.2.1 Inglaterra e País de Gales

No Reino Unido, o processo de reestruturação iniciou-se em Inglaterra em 1989, com a publicação do *Electricity Act*. Até então, o sector eléctrico era público e constituído por doze empresas de distribuição, que detinham o monopólio na sua área. Em 1989 introduziu-se o princípio da concorrência nos subsistemas da produção e da distribuição e criou-se uma entidade independente para gerir o transporte denominada por *National Grid Company* [OFGEM, URL].

O modelo de mercado adoptado foi o modelo em Bolsa, baseado num mecanismo de Mercado Assimétrico, em que cada unidade de produção tinha de declarar, até às dez horas da manhã de cada dia, a sua disponibilidade para o mercado, juntamente com o preço a que estava preparada para produzir, para cada meia hora do dia seguinte. As unidades eram, então, chamadas a produzir por ordem crescente de preços. A unidade

com preços mais elevados estabelecia o preço da energia que todos os outros recebiam para aquela meia hora. Deste modo, os produtores já não tinham nenhuma obrigação de fornecer energia nem nenhum mercado garantido, tinham sim de competir para ganhar a sua quota no mercado.

Relativamente à distribuição e fornecimento, as doze *Regional Electricity Companies* (RECs) em Inglaterra e País de Gales são as sucessoras directas das antigas áreas de distribuição. O negócio principal destas novas empresas é a distribuição e fornecimento de electricidade. Para assegurar a competição no fornecimento, as RECs têm a obrigação de permitir o livre acesso às suas redes de distribuição numa base não discriminatória. Como resultado, nem todos os consumidores a quem a REC fornece electricidade são necessariamente consumidores daquela empresa.

Pelo *Electricity Act* foi ainda criado o *Office of Electricity Regulation*, órgão regulador do sector eléctrico, que posteriormente viria a incluir o gás e seria rebaptizado como *Office of Gas and Electricity Markets* (OFGEM). Foi ainda estabelecida a figura de Director-Geral para a Electricidade (*General Director of Electricity Supply*), cuja função era regulamentar de acordo com as decisões do OFGEM. A este órgão regulador cabe:

- Garantir que o mercado da electricidade e do gás funcione de modo eficiente;
- Regular as actividades exercidas sob a forma de monopólios;
- Assegurar o fornecimento de electricidade e gás;
- Zelar pelo cumprimento das condições de funcionamento por parte das entidades licenciadas para o efeito;
- Respeitar as suas responsabilidades sociais e ambientais, nomeadamente, tendo em conta o efeito ambiental das actividades relacionadas com a geração, transporte e distribuição da energia e as directivas do Estado em termos sociais e ambientais.

O mercado funcionou durante 8 anos e, ao contrário do previsto, conduziu à volatilidade dos preços de mercado, revelando-se incapaz de reduzir os preços da energia eléctrica. Foi então iniciado um processo de discussão sobre a forma de organização do sector. Neste processo foram recolhidas várias propostas sobre como deveria evoluir o modelo organizativo. As conclusões apontavam para a necessidade de aumento de liberdade de escolha dos intervenientes no mercado e aumento da eficiência global do sistema, não descurando os aspectos relativos a segurança, fiabilidade e qualidade de serviço. Deste processo surgiu a *New Electricity Trading Arrangements* (NETA), uma nova organização do mercado que concedia a possibilidade de estabelecimento de Contratos Bilaterais entre produtores e consumidores, para além da Bolsa, e previa a criação de mercados *spot* e de futuros para transações a curto e longo prazos. A NETA entrou oficialmente em funcionamento a 27 de Março de 2001 [OFGEM Press Release, 2001].

Com a entrada em vigor da NETA, qualquer entidade que queira comprar ou vender energia eléctrica pode optar livremente pelo modo de transacção, através de Bolsa ou de Contratos Bilaterais. Nas transacções podem participar produtores, distribuidores, comercializadores e consumidores, independentemente de estarem ou não fisicamente ligados. A energia pode ser transaccionada para intervalos de tempo mais ou menos alargados.

A NETA fornece mecanismos que permitem auxiliar o Operador de Sistema a assegurar o encontro em tempo real entre a procura e a oferta, designado de *Balancing Mechanism* - Mecanismo de Equilíbrio, e mecanismos para lidar com as diferenças entre a energia contratada e a que é fisicamente produzida e/ou consumida, designados por *Imbalance Settlement* – Acerto de Contas.

O mecanismo de balanceamento é fundamental uma vez que a energia eléctrica não pode ser armazenada, sendo necessário manter em tempo real o equilíbrio entre a produção e o consumo para se poder garantir estabilidade no valor das tensões. Motivo este que se prende com o facto de nem sempre os níveis de energia que os produtores pretendem gerar (ou geram efectivamente) igualarem os níveis previstos (ou efectivos) de consumo, e nem sempre haver condições técnicas, nomeadamente devido à capacidade de transporte ser limitada, obrigam a que por vezes seja necessário ajustar o nível de produção ou consumo de geradores e cargas individuais.

Por outro lado, na prática muitas vezes os comercializadores acabam por comprar mais (ou menos) energia do que a que vendem; os produtores acabam por gerar mais (ou menos) energia do que a vendem e os distribuidores e consumidores acabam por consumir mais (ou menos) energia do que a que compram. O mecanismo de Acerto de Contas destina-se a gerir o desequilíbrio provocado pelos desvios entre as diferenças reais e os valores contratados, definindo as penalizações e a quem as aplicar. Mais pormenores sobre estes mecanismos podem ser encontrados em [NETA, 2000].

Dados disponibilizados pelo OFGEM [OFGEM, URL] indicam que desde que a NETA entrou em vigor os preços da energia eléctrica têm descido significativamente.

Na secção 4.3.6 é descrito um estudo, feito com base na tecnologia dos agentes, deste mercado e das suas novas regras, com a entrada em funcionamento da NETA.

2.2.2 Países Nórdicos

O primeiro mercado multinacional de energia eléctrica do mundo foi o Nord Pool, onde intervêm os países do Conselho Nórdico com a excepção da Islândia. A Noruega foi o país pioneiro do processo tendo a Suécia encetado um processo idêntico pouco tempo depois. Também a Finlândia e Dinamarca participam neste mercado.

O início do processo norueguês teve lugar em 1991 com a entrada em vigor do *Energy Act* que preconizava a liberalização dos subsectores da produção e da distribuição, pondo fim à integração vertical das empresas. O único subsector que continuou a ser encarado como um monopólio natural foi o do transporte. A nova legislação visava o desenvolvimento do sistema eléctrico norueguês através da criação dum mercado concorrencial onde actuassem produtores e compradores de energia. No seguimento das alterações impostas pelo *Energy Act*, o estado norueguês criou uma empresa que passou a explorar a rede de transporte, a Statnett, e outra vocacionada para o subsector da produção, a Statkraft.

Em Janeiro de 1992, a Suécia inicia também um processo de reestruturação do sector eléctrico. O governo sueco criou duas empresas: a Svenska Kraftnät, responsável pela exploração da rede de transporte e interligações internacionais; e a Vattenfall, responsável pelo subsector da produção.

A Noruega e a Suécia estreitaram a cooperação já existente, a partir de 1993, com o início de estudos tendentes à criação de um mercado de energia eléctrica comum [Cristie e Wangenstein, 1998a]. Ainda em 1993 a Statnett criou um mercado de energia para a Noruega, o Statnett Market, que viria a dar origem ao Nord Pool, com a integração da Svenska Kraftnät no início de 1996 [Cristie e Wangenstein, 1998b].

Na Finlândia, em 1995 a publicação do *Electricity Act* abriu o mercado finlandês de energia eléctrica à competição. Em Agosto de 1996 foi criado o mercado finlandês de energia eléctrica, o EL-EX, passando, em 1998, a Finlândia a fazer também parte do Nord Pool.

A partir de 2000 o Nord Pool passou a integrar todos os países nórdicos, à excepção da Islândia, ao abranger a zona Leste da Dinamarca, país que, em termos eléctricos, se encontrava dividido em duas áreas, tendo a zona Oeste integrado já o Nord Pool em 1999.

Actualmente o Nord Pool Group – Nordic Power Exchange – opera o mercado de contratos físicos e financeiros dos países nórdicos, e está organizado da seguinte forma [Nord Pool report, 2003]:

- Nord Pool ASA – companhia mãe;
- Nord Pool Spot – companhia associada responsável pelo mercado de contratos físicos, detida em partes iguais pelos 4 países que integram o Nord Pool e pela Nord Pool ASA;
- Nord Pool Financial Market – subsidiária da Nord Pool ASA, responsável pelo mercado financeiro de derivados;

- Nord Pool Clearing – funciona como uma espécie de instituição bancária, entrando como uma das partes contratantes nos contratos financeiros, permitindo assim reduzir o risco dos intervenientes nos mesmos;
- Nord Pool Consulting – subsidiária da Nord Pool ASA, especializada no desenvolvimento de mercados de energia.

Em termos de contratos físicos, existe o Elspot e o Elbas. O Elspot é o mercado *spot* nórdico, baseado num leilão onde se transacciona a energia eléctrica, em contratos de uma hora, a ser entregue no dia seguinte. Os participantes neste tipo de mercados são, além dos produtores e grandes indústrias, os distribuidores, retalhistas e correctores. O Elbas é um mercado de ajustes intra-diário, destinado a ajustes na Suécia e Finlândia. No Elbas os contratos podem ser efectuados até uma hora antes de se dar a entrega.

O mercado financeiro do Nord Pool permite estabelecer contratos de tipo *forward*, futuros e opções, sendo possível estabelecer contratos até um horizonte máximo de quatro anos.

2.2.3 Espanha

A Espanha constitui o terceiro caso europeu de reestruturação do mercado da energia eléctrica. Com base na Lei 54/1997, do Sector Eléctrico, inicia-se o processo de reestruturação do sistema eléctrico espanhol, declarando a liberdade de contratação e estabelecendo como base económica o mercado organizado de electricidade, com separação da gestão económica e técnica [Conejo, 1999].

O mercado de energia eléctrica está organizado num mercado diário, que entrou em funcionamento em 1 de Janeiro de 1998 e inclui Contratos Bilaterais físicos, e num mercado intradiário, que entrou em funcionamento em 1 de Abril de 1998 com apenas duas sessões, ampliadas no final desse ano a cinco sessões, sendo actualmente seis as sessões realizadas.

Os agentes de mercado são entidades habilitadas a actuar directamente no mercado como vendedores ou compradores de electricidade. Podem actuar como agentes de mercado os produtores, distribuidores, comercializadores, consumidores qualificados e companhias eléctricas ou consumidores residentes noutros países.

A gestão económica do mercado está a cargo da Companhia Operadora do Mercado Espanhol (OMEL), responsável pela gestão do mercado diário e intradiário, resolução de restrições técnicas, em conjunto com o Operador de Sistema, definição do preço final da energia para cada agente e das liquidações e facturação de todos os mercados e processos.

As funções de Operador de Sistema foram atribuídas à Rede Eléctrica Espanhola, sendo responsável pela gestão dos processos de funcionamento técnico do sistema eléctrico, devendo utilizar mecanismos competitivos, sempre que compatíveis com a salvaguarda da segurança e qualidade de funcionamento.

A Comissão Nacional de Energia (CNE) é a entidade reguladora do sector energético, e foi criada pela Lei 34/1998. O seu principal objectivo é o de zelar pela competência efectiva dos sistemas energéticos e pela objectividade e transparência do seu funcionamento [CNE, URL].

O mercado diário é o mercado em que se realizam a maioria das transacções. Nele se efectuam as transacções de energia eléctrica para o dia seguinte, tendo em conta as ofertas de venda apresentadas pelas unidades produtoras com capacidade disponível, não vinculada a Contratos Bilaterais, e as ofertas de compra por parte de distribuidores, comercializadores e consumidores qualificados. As ofertas de venda e compra podem realizar-se definindo várias tranches para cada hora do dia seguinte, tendo as várias tranches que apresentar preço crescente, no caso das ofertas de venda, e decrescente no caso das de compra. As ofertas de venda podem ser simples, apresentando para cada período horário e unidade de produção o preço e quantidade de energia, ou incorporar condições adicionais, como sejam condições de indivisibilidade, paragens programadas, entre outras. A OMEL efectua a análise das ofertas recebidas até às 10 horas do dia, e estabelece o preço e as ofertas de venda e compra aceites para cada período horário do dia seguinte, com base num mecanismo de Mercado Simétrico. Uma vez recebida a informação referente aos Contratos Bilaterais estabelecidos e à produção em regime especial, é estabelecido, às 11 horas, o programa diário base de funcionamento do mercado. Se as restrições técnicas de funcionamento do sistema eléctrico não tiverem sido respeitadas, é necessário efectuar ajustes, retirando ou incorporando energia, tendo em conta a precedência económica das ofertas apresentadas no mercado.

O mercado intradiário é um mercado de ajustes que está estruturado em seis sessões. Nele podem participar todos os agentes que, no caso dos agentes compradores, tenham participado no mercado diário ou estabelecido Contratos Bilaterais físicos. As ofertas podem apresentar 1 a 5 tranches para cada hora, respeitando preços crescentes no caso de ofertas de venda, e decrescentes no caso de ofertas de compra. As ofertas simples indicam um preço e quantidade para cada hora e as complexas podem apresentar condições adicionais, tais como: gradiente de carga, quantidade mínima ou preço máximo, aceitação completa da primeira tranche da oferta, entre outras. As curvas das ofertas de venda e compra são organizadas de acordo com o mecanismo de Mercado Simétrico, sendo definido o preço para cada período horário, e feitos os ajustes técnicos necessários ao funcionamento do sistema dentro dos parâmetros de qualidade, segurança e fiabilidade.

Os processos de gestão técnica do sistema fazem-se mediante a gestão de desvios e serviços complementares, que podem ser obrigatórios, no caso da regulação primária e controlo de tensão (requisito mínimo), ou complementares, no caso da regulação secundária, terciária, controlo de tensão (excedentes) e reposições de serviço. Estes processos, sempre que possível, fazem-se mediante pedidos desencadeados pelo Operador de Sistema aos quais as unidades de produção apresentam ofertas de venda que são avaliadas de acordo com a sua precedência económica.

Na figura 2.4 ilustra-se a sequência de operações do mercado espanhol.

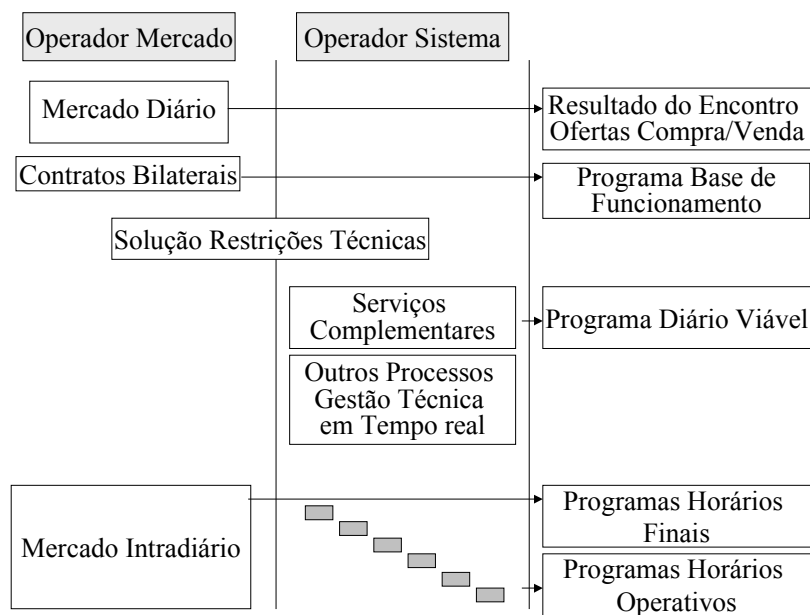


Figura 2.4: Sequência de Operações no Mercado de Energia Eléctrica Espanhol.

Na página da OMEL na Internet [OMEL, URL] é possível consultar informação variada sobre o mercado espanhol, desde a sua origem e regras de funcionamento a dados do mercado, tais como preços por período, e ofertas de venda e compra apresentadas (confidenciais durante certo período de tempo) dia após dia.

Actualmente Espanha e Portugal encontram-se num processo conjunto de concretização do Mercado Ibérico de Electricidade e Energia, de que se fala na próxima secção, após descrição do processo de reestruturação do sector eléctrico em Portugal.

2.3 Evolução do Mercado Eléctrico em Portugal

Durante muitos anos o sector eléctrico português e a empresa EDP, empresa detentora do monopólio a nível da produção, transporte e distribuição da energia eléctrica, confundiam-se. A partir do final da década de oitenta do século XX, altura em que, pelo

decreto-lei °449/88, foram abertas à iniciativa privada as actividades de produção e distribuição de energia eléctrica, o sector eléctrico foi alvo de mudanças.

A reestruturação do sector continuou a sua evolução através do decreto-lei nº99/91, que estabeleceu os princípios gerais do regime jurídico das actividades de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica.

No período de 1991-1995 verifica-se uma aceleração do processo, sendo publicada legislação variada sobre o sector. O decreto-lei nº182/95 define as bases e os princípios da organização e funcionamento do Sistema Eléctrico Nacional, com a redacção que lhe foi posteriormente dada pelos decretos-lei nº56/97, 24/99 e 198/2000.

Os princípios estabelecidos foram desenvolvidos pelos Decretos-Lei nº 183/95, 184/95, 185/95 e 187/95, que aprovaram também a regulação independente, através da criação da Entidade Reguladora do Sector Eléctrico, cujos estatutos foram alterados pelo Decreto-Lei nº97/2002, altura a partir da qual se passou a designar como Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), uma vez que as suas competências se alargaram ao domínio do gás natural [ERSE, URL].

Em Dezembro de 1996 foi publicada a Directiva 96/92/CE do Parlamento Europeu, que veio introduzir mais alterações no panorama jurídico e organizativo do sector eléctrico. Como consequência foi produzida regulamentação específica, como o Regulamento Tarifário, Regulamento de Relações Comerciais, o Regulamento de Acesso às Redes, entre outros, cuja primeira publicação ocorreu em 1998 e que mereceu já sucessivas revisões, no sentido de se enquadrarem correctamente com o normal desenvolvimento e alargamento do mercado liberalizado.

Actualmente, prepara-se uma revisão à Directiva 96/92/CE, com vista a avançar no sentido da construção de um mercado europeu de energia. Em fase de concretização está já o Mercado Ibérico de Electricidade e Energia, a que damos destaque mais à frente.

2.3.1 Estrutura do Sector Eléctrico

O SEN assenta na coexistência de um Sistema Eléctrico de Serviço Público (SEP) e de um Sistema Eléctrico Independente (SEI).

Ao SEP pertencem a Rede Nacional de Transporte (RNT), explorada em regime de concessão de serviço público pela Rede Eléctrica Nacional S.A. (REN), e o conjunto de instalações de produção (Produtores Vinculados) e redes de distribuição (Distribuição Vinculada) explorado mediante um regime de licença vinculada ao SEP. Os Produtores Vinculados relacionam-se comercialmente, em regime de exclusividade, com a concessionária da RNT, mediante Contratos de Aquisição de Energia (CAE's) de longo prazo, sendo a sua existência incompatível com a completa liberalização do mercado e daí se esperar a curto prazo a sua extinção. A Distribuição Vinculada está obrigada a fornecer

aos clientes do SEP, segundo tarifas e condições estabelecidas por regulação, a energia que estes contratarem.

A figura 2.5 ilustra a organização do Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

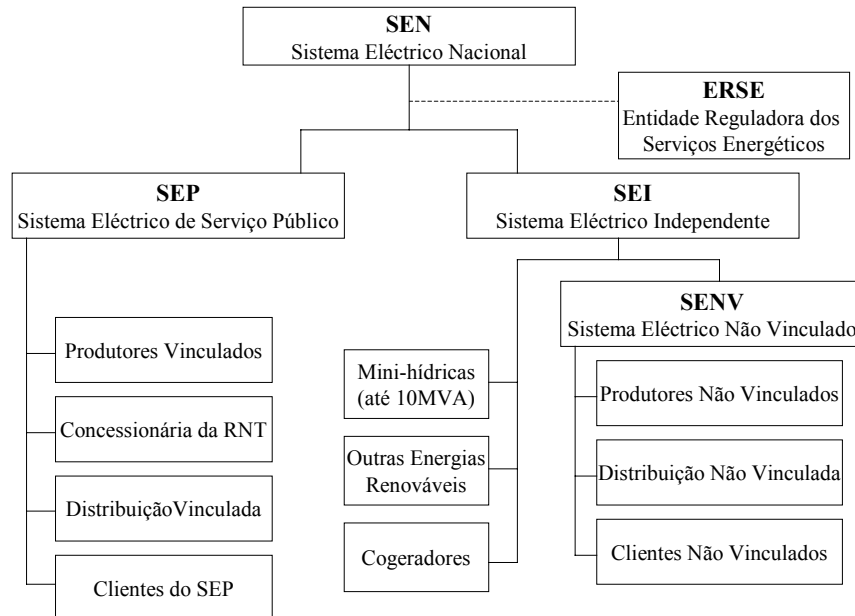


Figura 2.5: Organização do Sistema Eléctrico Nacional.

O SEI engloba o Sistema Eléctrico Não Vinculado (SENV) e os Produtores em Regime Especial (energias renováveis e cogeradores).

O SENV é regido pela lógica de mercado, e é composto por produtores não vinculados, distribuidores não vinculados e clientes não vinculados. Estes têm o direito a utilizar as redes do SEP para a transacção física de energia, mediante o pagamento de tarifas de uso de rede determinadas regulamentarmente. A transacção de energia é feita ao abrigo de regulamentação específica e gerida pela REN, através das figuras do Gestor de Ofertas e do Gestor de Sistema. Este subsistema, SENV, tem como finalidade a satisfação de necessidades próprias ou de terceiros, através de contratos comerciais não regulados, estabelecidos livremente pelos seus intervenientes.

A legislação consagra a igualdade de tratamento e de oportunidades a todos os interessados nas actividades englobadas no SEN, manifestando preocupações ambientalistas ao referir, no nº 3 do artigo 2º do Decreto-Lei 56/97 de 14 de Março de 1997, que “o exercício das actividades de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica desenvolve-se com base na utilização racional dos recursos naturais, na sua preservação e na manutenção do equilíbrio ecológico”.

Ao SEN cabe a regulação das actividades de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica no âmbito do SEP bem como a regulação das relações comerciais entre SEP e SENV.

A REN tem por missão a gestão técnica do SEN e a gestão global do SEP; cumpre-lhe ainda a responsabilidade pelo transporte de energia eléctrica, e pelo planeamento, construção, exploração e manutenção da RNT, a identificação de novos centros produtores do SEP e a constituição de uma carteira de sítios para os mesmos [REN, URL].

A REN adquire a energia às empresas de produção do sistema vinculado, que a vendem em regime de exclusividade, em termos e condições previamente acordadas contratualmente nos CAE's englobando o mecanismo de incentivo à eficiência das centrais produtoras. Note-se que, no modelo português, a disponibilidade dos centros produtores é premiada e remunerada, independentemente de se registarem efectivamente fornecimentos, ou seja, de haver solicitações de produção por opção do Despacho Nacional. Este estabelece a ordem de mérito – atribuição das quotas de produção por ordem crescente de custos – considerando os custos variáveis de aquisição de energia dos diversos centros produtores, e o valor das reservas de água.

Compete à ERSE supervisionar o cumprimento das regras de funcionamento do SEP e de relacionamento entre o SEP e o SENV, estabelecer os critérios de elegibilidade dos clientes para o SENV, regular as actividades exercidas no âmbito do SEP, nomeadamente fixar tarifas e preços para a energia eléctrica, bem como para os outros serviços fornecidos pela entidade concessionária da RNT e pelos detentores de licenças vinculadas de distribuição a outros detentores de licenças ou a clientes, procedendo à sua publicação em Diário da República.

Em termos de liberalização, os clientes elegíveis começaram por ser aqueles cujo consumo anual fosse superior a 30 GWh (ano de 1999). O limite tem vindo sucessivamente a baixar, tendo sido de 20 GWh em 2000, e 9 GWh em 2001. Actualmente o mercado encontra-se já aberto para clientes de Baixa Tensão Especial, alargamento estabelecido no Decreto-Lei nº36/2004, documento legal onde se prevê ainda a sua abertura a todos os consumidores.

Os distribuidores de energia, no âmbito da parcela livre, cujo limite é de 14%, já podem adquirir uma parte das suas necessidades de abastecimento a produtores fora do SEP, que neste momento é de 8%, podendo tal percentagem aumentar até ao referido limite por despacho da ERSE. Actualmente, a legislação nacional já permite a distribuição directa entre produtores e clientes elegíveis.

2.3.2 Mercado Ibérico de Electricidade e Energia

Portugal e Espanha acordaram, num protocolo assinado a 14 de Novembro de 2001, na constituição de um mercado integrado de electricidade, o Mercado Ibérico de Electricidade e Energia (MIBEL), actualmente em fase de concretização.

Nesta secção apresentam-se as linhas gerais de organização do MIBEL. Este é no entanto um assunto em evolução constante, uma vez que se encontra precisamente no início o seu processo de concretização, pelo que se chama a atenção para o facto de a informação aqui apresentada, baseada na proposta conjunta da ERSE e CNE [MIBEL, 2002] poder ainda vir a sofrer alterações, nomeadamente no que diz respeito à data de concretização de alguns pontos.

No MIBEL, a contratação de energia eléctrica, pode ser feita através de:

- Mercado livre de contratação bilateral física: permitindo-se o estabelecimento de contratos entre todo o tipo de produtores e os demais agentes qualificados;
- Mercados geridos pelo Operador de Mercado Ibérico:
 - mercados de produtos físicos a prazo: serão disponibilizados produtos normalizados, que podem assumir a forma de “blocos de energia” com uma duração fixa e pré-definida;
 - mercado diário: mercado organizado de curto prazo, para entrega de energia para cada um dos 24 períodos horários do dia seguinte, com funcionamento idêntico ao mercado diário já implementado em Espanha;
 - mercados de ajuste: mercado intradiário, com várias sessões diárias e que permite a participação de todos os agentes, independentemente do modo de contratação que elegeram previamente: bilateral, mercado a prazo ou mercado diário;
 - mercados de serviços de sistema: a evoluir no sentido de uma gestão unificada nos dois sistemas eléctricos, particularmente após a entrada em funcionamento da linha “Alqueva-Balboa”.

Os intervenientes no Mercado são:

- Operador de Mercado Ibérico;
- Operadores de Sistema;
- Produtores em Regime Ordinário;
- Consumidores Elegíveis;

- Comercializadores;
- Comercializador Regulado;
- Transportador;
- Distribuidor;
- Agente Externo;
- Conselho Ibérico de Regulação.

Operador de Mercado Ibérico

O Operador de Mercado Ibérico (OMI) é a entidade responsável pela gestão dos mercados diário, intradiário e a prazo. As suas funções incluem a recepção das ofertas de compra e venda de energia dos agentes de mercado, o encontro destas ofertas e a liquidação das transacções efectuadas nos mercados que gere, com base nos programas de compra e venda de energia.

O OMI será único e realizará as suas actividades em regime de exclusividade. A sua actividade será regulada e reger-se-á pelos princípios de transparência, objectividade e independência.

Na fase inicial os mercados a prazo e financeiros são geridos pelo pólo português do OMI, ao passo que os mercados diário e intradiário serão geridos pelo pólo Espanhol, prevendo-se a médio prazo a integração num único OMI.

Operadores de Sistema

Os Operadores de Sistema existentes nos dois países mantêm-se no contexto do MIBEL, sendo responsáveis pela segurança e gestão técnica do sistema em cada uma das suas áreas de controlo.

Produtores em Regime Ordinário

São entidades físicas ou jurídicas que produzem energia eléctrica em regime de concorrência, podendo construir, operar e manter as centrais de produção de energia de que são proprietários.

Os produtores podem estabelecer Contratos Bilaterais físicos, negociados directamente com os consumidores elegíveis ou comercializadores, ou participar nos mercados organizados. Podem também fornecer serviços de sistema, contratualizando o fornecimento desses serviços ou participando em mercados específicos organizados pelos Operadores de Sistema.

O produtor em regime ordinário deve colocar toda a sua capacidade disponível em cada momento no mercado. A participação nos mercados organizados será feita através da apresentação de ofertas de venda, sempre que o produtor disponha de capacidade de produção disponível.

A participação nos mercados de serviços de sistema é determinada pelas condições técnicas de cada tipo de instalação.

Consumidores Elegíveis

Os consumidores elegíveis têm direito a escolher livremente o seu fornecedor de energia eléctrica. São considerados consumidores elegíveis todos aqueles que verifiquem as condições estabelecidas pelas autoridades competentes. A curto prazo pretende-se que todos os consumidores passem a ser elegíveis.

Comercializadores

São pessoas jurídicas autorizadas a realizar o fornecimento de energia eléctrica a consumidores elegíveis, podendo vendê-la a produtores ou a outros agentes qualificados.

Os comercializadores devem garantir a todos os consumidores que o solicitem a satisfação das suas necessidades de energia.

Comercializador Regulado

O comercializador regulado pretende assegurar uma transição dos sistema actual para um novo sistema eléctrico que, se pretende, seja totalmente liberalizado. Assim, os comercializadores regulados exercerão, em termos gerais, a sua actividade de forma semelhante à dos restantes comercializadores, estando, no entanto, sujeitos a uma regulação que estabelece obrigações especiais relativas à aquisição de energia eléctrica para abastecimento dos seus clientes e à obrigatoriedade de praticarem a tarifa integral ou de venda a clientes finais aprovadas pelas autoridades de regulação.

O comercializador regulado deverá adquirir a energia necessária para abastecer os seus clientes exclusivamente nos mercados organizados a prazo, diário e de ajustes.

Transportador

A empresa responsável pela actividade de transporte é responsável pela construção, manutenção e gestão técnica das redes, por forma a permitir o acesso de terceiros, e por gerir de forma eficiente as infra-estruturas e os meios técnicos disponíveis, não podendo comprar nem vender energia eléctrica.

A prestação de serviços associados à actividade de transporte de energia eléctrica é remunerada através de tarifas reguladas de uso das redes de transporte.

Distribuidor

As empresas de distribuição são proprietárias das redes de distribuição sendo a sua actividade e remuneração regulada através de tarifas reguladas de uso das redes e prestação de serviços regulados. Não podem comprar ou vender energia eléctrica.

Agente Externo

São sujeitos que estão autorizados a entregar ou receber energia eléctrica proveniente de outros sistemas externos.

Conselho Ibérico de Regulação

Do Conselho Ibérico de Regulação fazem parte representantes dos dois Reguladores, ERSE e CNE.

2.4 Conclusões

De uma forma geral com a reestruturação do sector eléctrico pretende-se alterar as regras de funcionamento do sector de modo a permitir obter uma maior eficiência e uma competitividade acrescida que aproveite a todos os intervenientes desde a produção ao consumo. Este processo apresenta-se como muito complexo colocando à comunidade científica e empresarial diversos desafios.

Neste âmbito, diversos modelos de mercado têm surgido. A experiência de alguns países, pioneiros na reestruturação do sector eléctrico, fornece alguma orientação sobre o desempenho de alguns dos modelos de mercado implementados, sendo ainda prematuro tirar conclusões definitivas. Para tal, ferramentas que permitam estudar o desempenho de diferentes modelos de mercado, nomeadamente em termos do seu desempenho a longo prazo, são uma mais valia.

O relacionamento entre as entidades do sector eléctrico sofreu alterações no contexto da reestruturação, tendo mesmo surgido novas entidades, sobretudo dedicadas à gestão do sistema eléctrico e à comercialização da energia eléctrica. No que diz respeito às transacções comerciais, a análise de diferentes mecanismos de mercado e do relacionamento entre as entidades de mercado, torna-se fundamental. Para tal, salienta-se a necessidade de dispor de aplicações computacionais que permitam suportar as diversas actividades do mercado de energia eléctrica.

Contudo, o processo ainda não terminou, nomeadamente em Portugal onde se iniciou há bem pouco tempo a concretização do Mercado Ibérico de Electricidade e Energia em conjunto com a vizinha Espanha. São vários os aspectos a analisar, melhorar, e por vezes, redefinir. Todos os participantes no mercado desenvolvem interacções entre si necessitando, para tal, de sistemas de informação. E como o contexto é de adaptação a mudanças significativas, a necessidade de ferramentas de análise do mercado e de apoio à tomada de decisão, é também acentuada.

Neste capítulo foi feito o levantamento dos modelos e entidades dos mercados eléctricos reestruturados, bem como a análise de algumas experiências europeias. Ressaltam deste levantamento aspectos relacionados com a utilidade de ferramentas de suporte à análise dos mercados e suporte à tomada de decisão das entidades neles presentes. Neste trabalho pretende-se contribuir nesta área, através do desenvolvimento de um simulador de mercado, baseado na tecnologia multi-agente. Nos próximos

capítulos, após o levantamento do estado da arte na área dos Agentes e Sistemas Multi-Agente, é feita a descrição do simulador desenvolvido.

Capítulo 3

Sistemas Multi-Agente

Neste capítulo é feita uma introdução aos conceitos de Agente e Sistemas Multi-Agente, focando as suas características essenciais e requisitos próprios. Descrevem-se algumas plataformas de desenvolvimento de Sistemas Multi-Agente, dando particular destaque à *Open Agent Architecture*, por ter sido a plataforma utilizada no desenvolvimento do simulador proposto nesta Tese. São também analisadas diversas formas de interacção entre Agentes, dando-se especial destaque à Negociação, descrevendo-se alguns dos seus mecanismos, bem como estratégias e táticas de negociação.

Introdução

Agentes e Sistemas Multi-Agente representam uma forma de analisar, projectar e implementar sistemas de software complexos, sendo, desde os anos 80, uma das áreas de investigação e desenvolvimento com maior actividade. Este tipo de tecnologia tem sido usado em variadas aplicações como, por exemplo, Comércio Electrónico, Robótica, Sistemas Produtivos e Sistemas de Controlo de Tráfego.

Neste trabalho propomos usar a abordagem Multi-Agente para o estudo de Mercados Competitivos de Energia Eléctrica, através de uma ferramenta de simulação Multi-Agente em que as várias entidades dos Mercados de Energia Eléctrica, cada uma com os seus objectivos e estratégias de actuação, são representadas por Agentes que negociam entre si.

Importa pois, começar por clarificar as noções de Agente e Sistemas Multi-Agente, bem como as suas principais características, conceitos associados e formas de interacção. A negociação automática, uma das formas mais importantes de interacção entre agentes, assume especial destaque, uma vez que a negociação é uma forma de interacção fundamental entre as várias entidades dos Mercados de Energia Eléctrica. Assim, neste capítulo, apresentam-se alguns dos mecanismos de negociação mais usuais, e algumas das táticas e estratégias de negociação nas quais o comportamento dos agentes se pode basear.

3.1 Agentes

A Inteligência Artificial Distribuída surge no início dos anos 80, como um novo ramo de actuação da Inteligência Artificial no qual se estabelece a ligação com os Sistemas Distribuídos. Segundo Davis, a Inteligência Artificial Distribuída tem como objectivo a resolução de problemas para as situações nas quais um único resolvidor de problemas, uma única máquina ou uma única localização computacional não parecem apropriadas [Davis, 1980]. Desse modo, ao conceito de Sistema Inteligente centralizado, comum até ao final dos anos 70, sucede o conceito de Agente Inteligente, o qual está inserido num Sistema Distribuído.

A Inteligência Artificial Distribuída engloba duas áreas: a Resolução Distribuída de Problemas e os Sistemas Multi-Agente. Os Sistemas Multi-Agente permitem modelar o comportamento de um conjunto de entidades, designadas Agentes, mais ou menos

inteligentes e mais ou menos organizadas de acordo com leis do tipo social. Importa definir o que é um Agente.

A palavra “agente” é definida no dicionário com significados como: algo que age, capaz de produzir um efeito; algo ou alguém que age por, ou em lugar de, outrem, por autorização deste último.

No contexto da Inteligência Artificial, não existe na literatura uma definição comum para a definição de Agente. Contudo, apesar das várias definições existentes, algumas das características geram consenso, como por exemplo, a capacidade sensorial sobre o ambiente envolvente, a capacidade de interagir e reagir sobre o mesmo ambiente, a autonomia e as capacidades sociais de modo a permitir a interacção com outros Agentes [Wooldridge, 1999]. A figura 3.1 ilustra a interacção entre um Agente e o ambiente onde este está inserido.

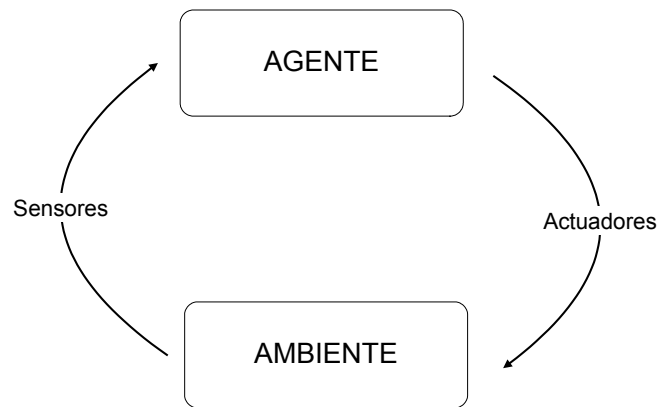


Figura 3.1: Um Agente e o seu ambiente.

3.1.1 Características

Das definições encontradas na literatura é possível identificar um conjunto de características ou propriedades que os Agentes podem possuir [Franklin e Graesser, 1996] [Wooldridge e Jennings, 1995]:

- **Autonomia:** os Agentes operam sem intervenção de seres humanos ou outros Agentes, e têm controlo sobre as suas próprias acções e sobre o seu estado interno; devem ser concebidos de modo a não bloquearem, mesmo quando ocorram falhas de informação;
- **Capacidade Social:** os Agentes interagem uns com os outros, e possivelmente com humanos, através de uma linguagem de comunicação;
- **Reactividade:** os Agentes têm percepção do que ocorre no seu ambiente e respondem em tempo útil às mudanças que nele vão ocorrendo;

- Pró-actividade: os Agentes não se limitam a responder às alterações do seu ambiente, mas possuem objectivos e exibem comportamento oportunista, sendo capazes de tomar a iniciativa;
- Mobilidade: o Agente possui capacidade de se movimentar entre máquinas ou sistemas computacionais diferentes;
- Capacidade Sensorial: o Agente dispõe de sensores para captar informação sobre o meio envolvente;
- Veracidade: o Agente não deverá comunicar propositadamente informação falsa;
- Benevolência: o Agente não deverá possuir objectivos contraditórios, tentando sempre fazer o que lhe foi pedido;
- Racionalidade: o Agente deverá actuar racionalmente de modo a alcançar os seus objectivos, e não de modo a evitar que os mesmos sejam atingidos;
- Persistência: os Agentes possuem continuidade temporal, sendo processos em execução contínua e não uma forma de computação isolada;
- Aprendizagem: o Agente apresenta a capacidade de adquirir conhecimento e altera o seu comportamento com base em experiências anteriores;
- Flexibilidade: o Agente não necessita que as suas tarefas estejam pré-definidas;
- Carácter: os Agentes possuem personalidade credível e comportamento emocional.

Embora seja difícil encontrar um Agente que possua todas as propriedades citadas, algumas delas são determinantes no estabelecimento do conceito de Agente. Wooldridge e Jennings apresentam mesmo duas noções para o conceito de Agente [Wooldridge e Jennings, 1995]. A noção fraca, em que o Agente é visto como um paradigma de automação da cooperação em ambientes distribuídos, sendo definido como exibindo as propriedades autonomia, sociabilidade, reactividade, pró-actividade e racionalidade. E a noção forte, em que o Agente é visto como uma entidade cognitiva e com consciência, capaz de exibir sentimentos, percepções e emoções.

3.1.2 Agentes e Objectos

Apesar de existirem óbvias semelhanças, existem também diferenças significativas entre Agentes e Objectos. Importa realçar que Objectos são entidades que encapsulam um dado estado de conhecimento, são capazes de realizar operações sobre esse estado, e comunicam entre si passando mensagens.

Uma das principais diferenças é o grau de autonomia de Agentes e Objectos [Jennings, 2001]. Um Objecto encapsula algum estado, e tem algum controlo sobre esse estado devido ao facto de só poder ser acedido e modificado pelos métodos que disponibiliza. Mas, um Objecto não possui controlo sobre o seu comportamento. Ou seja, um Objecto ao disponibilizar um método *m*, tornando-o disponível para ser invocado por outros Objectos quando o desejarem, não tem controlo sobre se esse método é ou não executado, nem sobre quando é executado. Nesse sentido o Objecto não é autónomo e não tem controlo sobre as suas acções. Um Agente tem esse controlo sobre as acções que realiza. Por outro lado, os Agentes não invocam métodos de outros Agentes, antes requerem que acções sejam realizadas.

O controlo de execução das acções é também diferente entre Objectos e Agentes. No caso dos Objectos a decisão está no Objecto que invoca o método. No caso dos Agentes a decisão reside no Agente que recebe o pedido.

Outra importante distinção entre Agentes e Objectos diz respeito à noção de flexibilidade, no sentido de reactividade, pró-actividade e capacidade social, do comportamento autónomo que os Agentes exibem e os Objectos geralmente não exibem.

3.1.3 Tipos de Agentes

Quanto à mobilidade os Agentes podem ser de dois tipos:

- Agentes Móveis: são Agentes que possuem a capacidade de se movimentar entre ambientes computacionais distintos;
- Agentes Estacionários: são os que se encontram adstritos a um ambiente computacional, do qual não podem migrar.

A mobilidade não se prende com o facto dos dispositivos serem móveis ou estacionários, uma vez que podemos ter agentes móveis numa rede de desktops e um agente estacionário num PDA móvel ligado à rede sem fios.

Quanto ao seu comportamento os Agentes podem ser:

- Agentes Reactivos: agem de acordo com a percepção que têm do ambiente que os rodeia, através da invocação de um conjunto de regras de percepção/reacção;
- Agentes Deliberativos: mantêm uma representação interna do ambiente que os rodeia, através de um estado mental explícito que pode ser modificado através de raciocínio simbólico.

Nwana acrescenta, aos tipos de Agentes já descritos, uma outra classificação [Nwana, 1996] que se baseia na presunção de que um Agente deve possuir um conjunto mínimo

de atributos, tais como a autonomia, a cooperação e a aprendizagem. Esta visão vai de encontro à proposta em [Wooldridge e Jennings, 1995] e consiste na definição dos tipos:

- Agentes Colaborativos;
- Agentes Colaborativos com Aprendizagem;
- Agentes de Interface;
- Agentes Inteligentes.

Na figura 3.2 ilustra-se qual a ênfase de cada atributo na definição dos quatro tipos descritos. O que não significa que seja uma classificação estanque, ou seja, que, por exemplo, um Agente Colaborativo não possa aprender, mas antes que neste tipo de Agente os atributos mais relevantes são a Cooperação e a Autonomia.

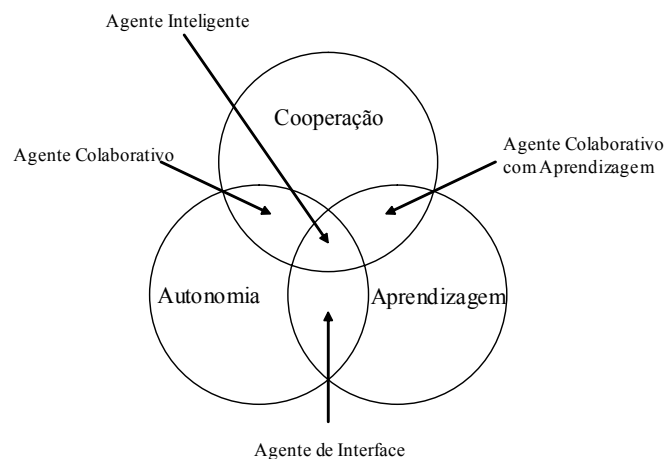


Figura 3.2: Tipologia de Agentes baseada na proposta de Nwana [Nwana, 1996].

Em resumo, um agente deve, em princípio, apresentar:

- Capacidade de aquisição de conhecimento;
- Comportamento orientado por objectivos;
- Facilidade em adquirir novas aptidões.

3.1.4 Arquitecturas de Agentes

A arquitectura de um agente determina a sua estrutura interna, definindo os módulos que estarão envolvidos nas várias tarefas cobertas pelo agente e o modo como tais módulos interagem entre si com vista a operarem no ambiente sobre o qual interagem.

O conjunto de todos os módulos e suas interações tem que permitir definir de que forma os dados recebidos do ambiente, em que o agente se encontra, e o estado interno do agente determinam as suas acções e estado futuro [Maes, 1991].

São identificadas três grandes categorias de arquitecturas de agentes: deliberativas, reactivas e híbridas [Wooldridge e Jennings, 1995].

3.1.4.1 Arquitectura Deliberativa

Um agente deliberativo contém um modelo simbólico explícito do mundo, e as suas decisões (por exemplo, selecção de qual a acção a realizar) são tomadas com base em raciocínio lógico. Na figura 3.3 ilustra-se esta arquitectura.



Figura 3.3: Arquitectura Deliberativa.

Neste tipo de arquitecturas levantam-se problemas como a tradução do mundo real em descrições simbólicas adequadas e a forma de levar os agentes a raciocinar.

Arquitectura BDI

A arquitectura BDI (“Belief-Desire-Intention”) é uma arquitectura deliberativa que suporta a concretização das Crenças, Desejos e Intenções de um agente. Neste tipo de arquitectura os estados mentais do agente representam um papel central. O estado interno de conhecimento do agente é descrito com base nos seus estados mentais, estados estes de que o agente fará uso para determinar o seu curso de acção [Rao e Georgeff, 1995].

- Crenças: as crenças de um agente referem-se ao que o agente acredita ser possível em determinado momento, e descrevem a perspectiva do agente sobre o estado do ambiente. As crenças representam informação. Um outro conceito relacionado com o de crença é o conceito de conhecimento;
- Desejos: os desejos referem-se ao que o agente deseja obter, não necessitando obrigatoriamente de conhecer a forma como o pretende fazer. Um conceito relacionado com o desejo é o conceito de objectivo;

- **Intenções:** as intenções referem-se a um conjunto de acções ou tarefas que o agente seleccionou, e que podem ajudar na concretização dos seus objectivos. Um conjunto de intenções é o resultado de uma deliberação.

A arquitectura de um agente BDI é constituída por sete componentes principais [Wooldridge, 1999]:

- **Conjunto de crenças:** que representam a informação que o agente tem do ambiente;
- **Função de revisão de crenças:** que actualiza o conjunto de crenças do agente com base nos eventos recebidos e nas crenças actuais do agente;
- **Função de geração de opções:** determina as opções (desejos) disponíveis para o agente, com base nas suas crenças e intenções actuais;
- **Conjunto de opções:** conjunto que representa as acções (desejos) possíveis para o agente;
- **Função de filtragem:** representa o processo de deliberação do agente, que determina as intenções do agente com base nas suas crenças e desejos actuais;
- **Conjunto de intenções:** conjunto de estados que o agente pretende obter;
- **Função de selecção de acção:** função que determina qual a acção a realizar em cada momento com base nas intenções do agente.

O modelo BDI é atractivo por ser intuitivo e por dar uma visão clara da composição funcional do agente, a maior dificuldade está em implementar de forma eficiente essas funcionalidades.

3.1.4.2 Arquitectura Reactiva

Na figura 3.4 ilustra-se esta arquitectura.

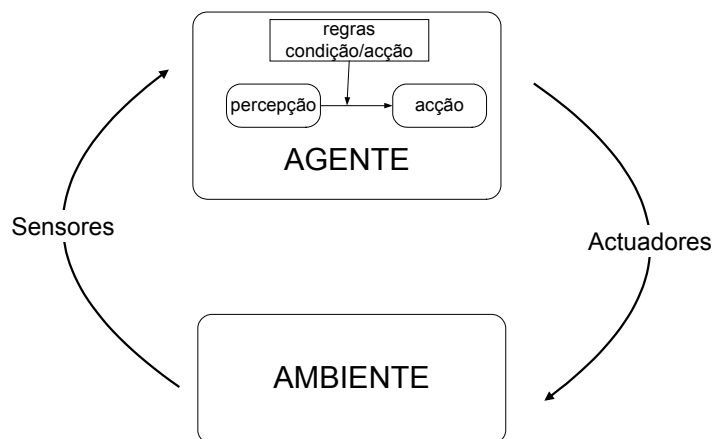


Figura 3.4: Arquitectura Reactiva.

Ao contrário dos agentes deliberativos, um agente reactivo não inclui qualquer tipo de modelo simbólico do ambiente e não usa nenhum mecanismo de raciocínio lógico complexo, antes, realiza as suas decisões com base num conjunto de regras simples de situação/acção. No fundo, reagem a estímulos adoptando comportamentos.

3.1.4.3 Arquitectura Híbrida

Os agentes reactivos são de certa forma redutores, o que dificulta a implementação de estratégias direccionadas para atingir um certo objectivo. Por outro lado, os agentes deliberativos são, ao exibirem formas de raciocínio e/ou representação de conhecimento complexas, muitas vezes incapazes de reagir de forma rápida a estímulos vindos do exterior.

Os agentes híbridos tentam reunir as vantagens das arquitecturas deliberativas e das arquitecturas reactivas, e caracterizam-se por terem uma arquitectura composta por vários módulos, ou camadas, hierárquicos. Na figura 3.5 ilustra-se este tipo de arquitectura.

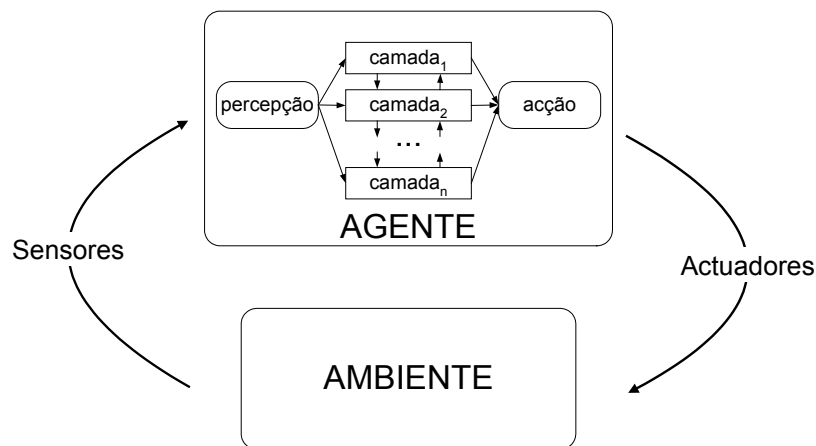


Figura 3.5: Arquitectura Híbrida.

Frequentemente à componente reactiva é dada precedência sobre a deliberativa de forma a permitir-se uma resposta rápida a alterações ambientais importantes. Podemos tentar estabelecer a analogia com um condutor que estava a seguir um caminho previamente planeado. Nesse caminho podemos ter um tráfego acima do normal, o condutor pode reagir a estímulos, pondo o pé no travão quando o carro da frente pára bruscamente numa fila, mas ao mesmo tempo o condutor pode estar a replanear a sua trajectória, pensando no modo de seguir um caminho alternativo para evitar o excesso de tráfego.

3.2 Sistemas Multi-Agente

Tradicionalmente a investigação em sistemas baseados em múltiplos agentes pertencia ao campo da Inteligência Artificial Distribuída, tendo sido esta dividida em Resolução Distribuída de Problemas e Sistemas Multi-Agente.

A Resolução Distribuída de Problemas, considera a forma como um problema pode ser resolvido por vários módulos, ou nós, que cooperam na resolução de um problema específico. Por outro lado, um Sistema Multi-Agente pode ser definido como uma rede de agentes que trabalham em conjunto para resolver um problema que está para além das suas capacidades individuais [Durfee e Rosenschein, 1994] [O'Hare e Jennings, 1996].

Num Sistema Multi-Agente não se pode assumir que os agentes possuem um objectivo comum, muitas vezes eles representam os interesses e objectivos de diferentes entidades ou organizações. Os interesses de um agente podem entrar em conflito com os de outros agentes, tal como acontece nas sociedades humanas. Apesar da possibilidade de conflito de interesses, os agentes terão que cooperar de modo a atingir os seus objectivos, também à semelhança das sociedades humanas.

A investigação em Sistemas Multi-Agente aborda aspectos do projecto de sociedades de agentes autónomos, tais como, a forma como, e quando, os agentes cooperam; como os agentes podem reconhecer e resolver conflitos; como os agentes podem negociar ou comprometer-se em situações de aparente discórdia.

As características de um Sistema Multi-Agente são:

- cada agente tem informação, ou capacidade de resolução de problemas, incompleta, ou seja, cada agente tem um ponto de vista limitado;
- não há um controlo global do sistema;
- os dados são descentralizados;
- a computação é assíncrona.

Algumas das razões para a crescente motivação no uso de Sistemas Multi-Agente são:

- a capacidade de resolução de problemas com dimensão elevada para um único agente, devido à limitação de recursos ou ao simples risco de ter um sistema centralizado;
- fornecer soluções para a distribuição de problemas;
- permitir a interligação de sistemas pré-existentes, como por exemplo, sistemas periciais ou sistemas de apoio à decisão;

- permitir aumentar a velocidade de processamento (desde que a comunicação entre as entidades seja mantida a um nível mínimo necessário), a fiabilidade, a extensibilidade e a capacidade de tolerar dados e conhecimento incertos;
- fornecer soluções para situações em que o conhecimento está distribuído;
- oferecer simplicidade conceptual e de projecto.

Os Sistemas Multi-Agente são adequados a problemas que têm vários métodos de resolução, várias perspectivas e/ou várias entidades. Tais sistemas têm a tradicional vantagem da distribuição e execução concorrente de problemas, além da adicional vantagem de permitirem formas de interacção sofisticadas. Tipos comuns de interacção incluem: coordenação, na qual se organiza a actividade de resolução de problemas por forma a evitar interacções prejudiciais e explorar interacções benéficas; e negociação, com vista a chegar a um acordo aceitável para as partes envolvidas.

Apesar das evidentes vantagens dos Sistemas Multi-Agente, o desenvolvimento deste tipo de sistemas apresenta também bastantes desafios [Jennings et. al., 1998a], nomeadamente no que diz respeito às seguintes questões:

- Como formular, decompor e atribuir os problemas a um grupo de agentes?
- Como permitir a comunicação e interacção entre agentes? Quais as linguagens e protocolos de comunicação? Como e quando comunicar?
- Como assegurar que os agentes agem coerentemente na tomada de decisões?
- Como reconhecer e resolver pontos de vista díspares e situações de conflito num conjunto de agentes tentando coordenar as suas acções?

De seguida abordam-se aspectos relacionados com a resposta a algumas destas questões.

3.2.1 Cooperação, Competição e Coordenação entre Agentes

Um aspecto fundamental de um Sistema Multi-Agente prende-se com a interacção entre os diversos agentes que constituem o sistema. Para que seja possível resolver problemas de forma coerente é necessário que os agentes comuniquem entre si, coordenem as suas actividades, negociem e lidem com conflitos.

Uma das formas mais simples de assegurar um comportamento coerente ao sistema será incluir um agente que possua uma visão mais alargada do sistema, explorando assim, uma estrutura hierárquica. No entanto, trata-se de uma abordagem pouco prática para aplicações reais, uma vez que será muito difícil criar um controlador central informado sobre os desejos e intenções de todos os agentes do sistema.

A coordenação é um aspecto fundamental de um Sistema Multi-Agente, sem o qual os benefícios da interacção entre os agentes desaparecem correndo-se o risco de o sistema rapidamente degenerar num conjunto de agentes com comportamento caótico. Na coordenação, os agentes integram o seu conhecimento e recursos para alcançar um objectivo comum, que em termos individuais não conseguiriam.

Um dos métodos mais reconhecidos de coordenação, para atribuição de tarefas e recursos entre agentes, é o Protocolo de Rede de Contrato [Smith, 1980] [Davis e Smith, 1983]. Proposto inicialmente por Davis e Smith como um mecanismo de negociação, a sua aplicação considera-se mais abrangente, tal como em [Jennings et al., 1998a], como um método de coordenação para atribuição de tarefas. No entanto, são vários os mecanismos de negociação que se baseiam no princípio proposto por este protocolo, tal como iremos abordar na secção 3.3.

Protocolo Rede de Contrato

Este protocolo baseia-se em dois tipos de papéis, o de Consumidor e o de Fornecedor, podendo cada agente desempenhar qualquer um desses papéis em momentos diferentes, e mesmo em simultâneo, para tarefas diferentes.

O pressuposto base para esta forma de coordenação é que, se um agente não consegue resolver um determinado problema usando os recursos/conhecimento local, irá decompô-lo em sub-problemas e tentar encontrar outros agentes com os recursos/conhecimento necessários à resolução desses sub-problemas. O problema de atribuição de sub-problemas é resolvido com base num mecanismo de contrato que consiste essencialmente em três fases. A figura 3.6 ilustra as várias fases do protocolo.

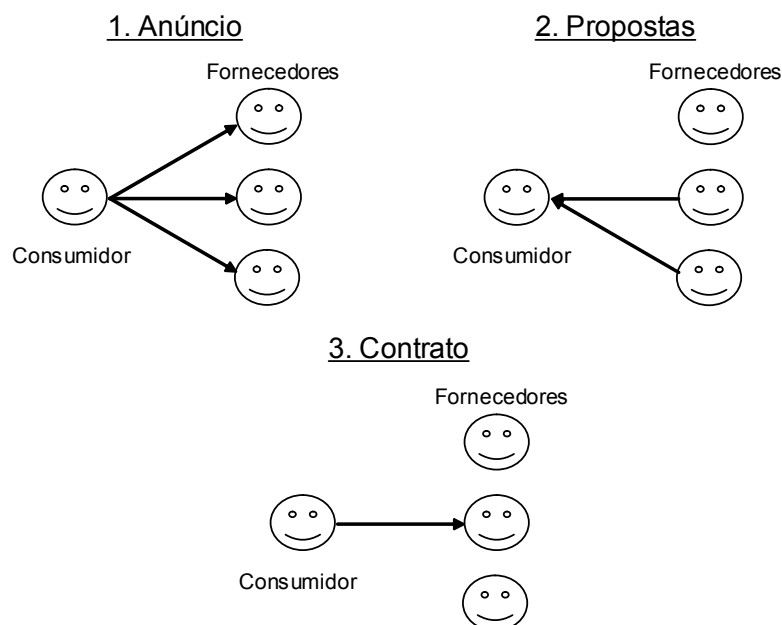


Figura 3.6: Protocolo de Rede de Contrato.

Na primeira fase, o agente que necessita de ajuda na resolução de um sub-problema, agente Consumidor, coloca um anúncio especificando qual a tarefa que necessita de ser realizada. Este anúncio chega aos outros agentes, Fornecedores, que, numa segunda fase, irão preparar, ou não, uma proposta a enviar ao agente Consumidor. A segunda fase é por isso, uma fase de competição entre os agentes Fornecedores. Por fim, na terceira fase, o agente Consumidor que colocou o anúncio terá que analisar as propostas recebidas e decidir qual dos agentes Fornecedores fez a proposta que melhor o satisfaz, contratando o serviço a esse Fornecedor.

Na competição, os agentes têm interesses próprios, por vezes antagónicos; neste caso a negociação fornece mecanismos e formas de coordenação. A negociação é o processo de comunicação entre agentes no sentido de se alcançar um acordo mutuamente aceite, e que os beneficie. O acordo pode dizer respeito a um preço, ao local e horário de uma reunião, a uma acção ou objectivo comum. O processo de negociação envolve a troca de informação, a relaxação de objectivos e concessões mútuas. A negociação pressupõe o atingir de um consenso.

O processo de negociação pode ser de diversas formas, desde leilões, protocolos baseados no Protocolo de Rede de Contrato, a argumentação. A este tema é dado especial destaque, uma vez que este trabalho tem por objectivo o estudo da negociação em Mercados Competitivos de Energia Eléctrica, pelo que a secção 3.3 lhe será inteiramente dedicada.

A coordenação entre agentes num Sistema Multi-Agente obriga à interacção e troca de informação, os agentes precisam por isso de comunicar. Assim é necessário proceder à análise, definição, especificação e implementação de um conjunto de funcionalidades:

- Linguagem de comunicação;
- Ontologia;
- Plataforma de desenvolvimento de Agentes.

Nas secções que se seguem iremos abordar as funcionalidades relacionadas com a comunicação entre os agentes.

3.2.2 Linguagens de Comunicação entre Agentes

A interacção entre agentes obriga a que estes comuniquem, independentemente da heterogeneidade que possa existir entre as suas plataformas de desenvolvimento, linguagens de programação, linguagens de representação interna de conhecimento ou sistemas de raciocínio.

Uma linguagem de comunicação entre agentes é a forma pela qual são comunicadas as atitudes relativas ao conteúdo de uma mensagem [Labrou e Finin, 1997].

Muitas são as linguagens que têm sido apresentadas de forma a resolver o problema da interacção entre agentes, sendo algumas delas:

- Knowledge Query Manipulation Language (KQML);
- Knowledge Interchange Format (KIF);
- Foundation for Intelligent Physical Agents - Agent Communication Language (FIPA - ACL);
- Interagent Communication Language (ICL).

KQML

A KQML é uma linguagem de comunicação entre agentes que lhes permite transmitir informação, descrita numa qualquer linguagem por eles escolhida, encapsulada numa mensagem KQML. KQML ignora o conteúdo da mensagem, excepto no que diz respeito ao reconhecimento do seu início e fim.

KQML está dividida em três níveis [KQML, URL]:

- Conteúdo: inclui a informação a ser transmitida, na linguagem de representação própria dos agentes. A linguagem KQML aceita qualquer tipo de linguagem de representação pois o conteúdo é ignorado, durante o processo de transmissão, no que diz respeito à sua interpretação, cabendo essa tarefa ao agente receptor;
- Mensagem: inclui o conteúdo da mensagem, mas também a intenção do emissor da mensagem, especificando qual o tipo de interacção entre os agentes emissor e receptor. Pode ainda incluir informação adicional como a identidade dos agentes, o formato da informação ou da ontologia adoptada;
- Comunicação: acrescenta à mensagem alguns parâmetros relacionados com a comunicação de baixo nível, como sejam, por exemplo, a identidade do emissor/receptor, ou identificador único associado à comunicação.

KIF

O KIF denota um formalismo computacional para a troca de conhecimento entre sistemas computacionais. É do tipo declarativo e suporta a interpretação de expressões formuladas em termos da Lógica de Predicados de Primeira Ordem.

A sintaxe da linguagem KIF pode ser descrita através de três camadas. Primeiro, os caracteres, a camada mais básica da linguagem. Estes caracteres podem ser combinados para formar lexiomas, que por sua vez podem ser combinados para formar expressões gramaticais [KIF, URL].

FIPA - ACL

A linguagem ACL da FIPA permite uma abordagem diferente à comunicação entre agentes, sendo composta pelo KQML como linguagem de comunicação, o KIF como formalismo, e ontologias, que definem classes, funções e alfabetos com aplicação a um determinado universo de discurso, a que se associa uma axiomática que permite a interpretação das mensagens.

Uma mensagem ACL contém um conjunto de um ou mais parâmetros. A definição dos parâmetros necessários irá depender da situação concreta, no entanto existe um parâmetro (*performative*) que é obrigatório em todas as mensagens, e que especifica o tipo de comunicação, embora seja também esperado que uma mensagem contenha ainda a especificação do emissor, receptor e conteúdo da mensagem [FIPA, URL].

ICL

A ICL [OAA, URL] é a linguagem de interface, comunicação e coordenação comum a todos os agentes de um sistema desenvolvido na *Open Agent Architecture* (OAA) independentemente da plataforma em que correm e da sua linguagem de programação. A ICL inclui uma camada de protocolo de comunicação, análoga ao KQML, e uma camada conteúdo, semelhante à fornecida pelo KIF. A camada conteúdo do ICL é construída como uma extensão da linguagem Prolog, permitindo assim tirar partido das características do Prolog. As bibliotecas de suporte ao desenvolvimento de agentes em outras linguagens que não o Prolog fornecem procedimentos que permitem interpretar, criar e estruturar as mensagens ICL.

Na secção 3.2.4 é feita a descrição da OAA, sendo apresentado um exemplo da construção de agentes e uso da linguagem ICL.

3.2.3 Ontologia

Os Agentes que comunicam usando uma mesma linguagem podem mesmo assim não ser capazes de se entender se usarem um vocabulário ou uma representação do conhecimento diferente para representar conceitos do mesmo domínio. Para tal, é necessário que os agentes concordem em um modelo do mundo, que permita assegurar um entendimento correcto e mútuo da informação a tratar, isto é, é necessário que acordem em uma ontologia comum.

Uma ontologia é a especificação explícita de uma conceptualização [Gruber, 1993]. Uma conceptualização é uma forma simplificada e abstracta de representar o mundo. A ontologia fornece o vocabulário de representação para um domínio específico, e um conjunto de definições e axiomas que restringem o significado dos termos nesse vocabulário, de modo a permitir uma interpretação consistente e única. A adopção de uma ontologia irá, assim, garantir a consistência (a mesma expressão tem o mesmo

significado para qualquer agente) e compatibilidade (qualquer conceito é designado pela mesma expressão por qualquer agente) da informação.

Num Sistema Multi-Agente as ontologias são fundamentais para que vários agentes possam estabelecer uma plataforma comum sobre a qual assente a troca de conhecimento entre agentes. Com uma linguagem de comunicação comum, um conteúdo de linguagem comum e uma ontologia partilhada, os agentes conseguem comunicar entre si na mesma forma, na mesma sintaxe e com o mesmo entendimento do mundo.

3.2.4 Plataformas de Desenvolvimento de Agentes

A plataforma de comunicação disponibiliza o meio físico para a transmissão de informação entre os agentes.

A Internet e serviços associados (WWW, FTP, E-mail, Telnet) representam um veículo importante para a transmissão de informação e no suporte a entidades distribuídas que necessitam de interactivar. Isto porque, a Internet é uma rede pública, acessível a todos, é de fácil utilização e apresenta um custo reduzido. No entanto, a Internet por si só não resolve toda uma série de problemas associados à comunicação entre entidades distribuídas e heterogêneas. Neste âmbito, outras plataformas de comunicação foram sendo desenvolvidas.

A comunicação entre agentes segue uma classificação dada por Ferber [Ferber, 1999]:

- A ligação entre o remetente e o destinatário pode ser do tipo ponto a ponto, em que o agente remetente envia uma mensagem ao destinatário, identificando-o, ou multiponto, em que os potenciais destinatários da mensagem constituem o colectivo do sistema;
- A natureza do meio ou canal de comunicação pode ser do tipo por reencaminhamento directo, em que o agente envia a mensagem ao canal de comunicação e este encarrega-se de a fazer chegar ao respectivo endereço, ou então, por reencaminhamento por propagação de nível, em que uma mensagem é difundida pelo ambiente e a sua intensidade vai crescendo à medida que a distância entre as partes aumenta, ou ainda, por reencaminhamento por anúncio público, situação em que a mensagem é colocada num espaço comum que é visível para todas as entidades do sistema;
- A intenção da comunicação pode ser do tipo intencional, nos casos em que o processo que determina a comunicação é encetado voluntariamente pelo agente, ou não intencional, quando este processo se dá de uma forma que é independente da vontade do emissor.

Apresentam-se em seguida algumas plataformas de comunicação entre agentes, dando particular relevo à OAA, por ter sido a plataforma de comunicação utilizada no decorrer deste trabalho.

AgentBuilder

Trata-se de uma ferramenta, comercializada pela IntelliOne Technologies Corporation, que permite o desenvolvimento de software baseado em agentes inteligentes [AgentBuilder, URL]. Os agentes construídos em AgentBuilder usam a linguagem KQML, sendo no entanto possível definir novas formas de comunicação entre os agentes, que sejam mais adequadas a aplicações específicas.

O AgentBuilder é constituído pelo *AgentBuilder Toolkit* e pelo *Run-Time System*. O *AgentBuilder Toolkit* contém ferramentas para gerir o processo de desenvolvimento dos agentes; analisar o domínio de aplicação do problema e identificar os conceitos relevantes para o funcionamento do agente nesse domínio; projectar e desenvolver redes de agentes que comunicam e cooperam; definir o comportamento individual dos agentes e ferramentas de análise e teste do software desenvolvido. O *Run-Time System* inclui o mecanismo que fornece o ambiente de execução dos agentes de software.

JATLite

A plataforma JATLite (Java Agent Template, Lite) [JATLite, URL] foi desenvolvida na Universidade de Stanford, e destina-se a facilitar a comunicação entre agentes heterogêneos e distribuídos, com recurso à linguagem de programação Java. A comunicação entre os agentes é feita por troca de mensagens, facilitando-se particularmente a troca de mensagens usando a linguagem KQML (abordada na secção seguinte). A comunicação é feita usando o protocolo TCP/IP.

A plataforma JATLite assenta num componente designado por Agent Message Router (AMR). Qualquer agente que pretenda pertencer ao sistema terá que se registar no AMR, através da especificação de um nome e uma palavra chave. O AMR gere todo o processo de encaminhamento de mensagens, recebendo mensagens de um agente emissor e entregando-as ao agente receptor respectivo. O AMR é responsável por garantir a entrega de mensagens, mesmo que a rede de comunicação esteja temporariamente interrompida ou o agente receptor temporariamente inactivo. O AMR é também responsável por manter actualizados os endereços de todos os agentes do sistema.

Mozart

Mozart é uma plataforma para desenvolvimento de aplicações distribuídas inteligentes, desenvolvida em conjunto pela Saarland University, o Swedish Institute of Computer Science, o German Research Center for Artificial Intelligence e a Université Catholique de Louvain. Fornece ambiente de desenvolvimento interactivo para plataformas Unix e Windows. É baseado na linguagem Oz, uma linguagem multi-paradigma, que suporta

programação declarativa, programação orientada a objectos, programação em lógica, e concorrência [Mozart, URL].

Em Mozart um programa distribuído é um programa que está dividido por vários “sítios”, sendo um “sítio” um processo de um Sistema Operativo. Os “sítios” podem correr numa mesma máquina ou em máquinas diferentes. O desenvolvimento de aplicações distribuídas é bastante facilitado uma vez que um programa irá executar exactamente do mesmo modo, independentemente da forma como está dividido por vários sítios. As suas características multi-paradigma e de distribuição tornam Mozart uma ferramenta atractiva para o desenvolvimento de sistemas Multi-Agente.

OAA

A OAA é uma ferramenta para a criação de Sistemas Multi-Agente, que foi desenvolvida no Centro de Inteligência Artificial do SRI International e cujo principal objectivo é o de fornecer um meio para a integração de aplicações heterogéneas numa infra-estrutura distribuída [OAA, URL]. A OAA está estruturada por forma a:

- minimizar o esforço envolvido na criação de novos agentes, e no encapsulamento de aplicações pré-existentes, escritos em linguagens diferentes e funcionando em diferentes plataformas;
- encorajar a reutilização de agentes já existentes;
- permitir dinamismo e flexibilidade na constituição de comunidades de agentes;
- permitir incluir o utilizador como membro da comunidade de agentes.

Num sistema OAA a figura central é um agente designado *Facilitator*, que é responsável por coordenar a comunicação e resolução cooperativa de problemas. O *Facilitator* mantém uma base de conhecimento sobre o conjunto de agentes e suas capacidades, e usa-as para ajudar fornecedores e solicitadores de serviços a estabelecerem contacto. Todos os restantes agentes são considerados agentes clientes, uma vez que actuam, de certa forma, como clientes do *Facilitator*, que lhes fornece serviços essenciais, como o de comunicação.

Qualquer agente terá que começar por estabelecer uma conexão com um *Facilitator*, informando-o dos serviços que é capaz de fornecer. Quando o agente for solicitado, o *Facilitator* envia-lhe um pedido, o agente processa-o, podendo para tal solicitar serviços de outros agentes, e envia a resposta ao *Facilitator*.

A figura 3.7 ilustra a estrutura típica de um sistema OAA.

Na figura ilustram-se ainda os Meta-Agentes, cuja categoria é reconhecida apenas por convenção, ou seja, não se distinguem formalmente no sistema. O papel dos Meta-Agentes é o de ajudar o *Facilitator* no processo de coordenação dos vários agentes. Enquanto o *Facilitator* possui estratégias de coordenação independentes do domínio de

aplicação, os Meta-Agentes aumentam as suas capacidades usando conhecimento e raciocínio específico à aplicação.

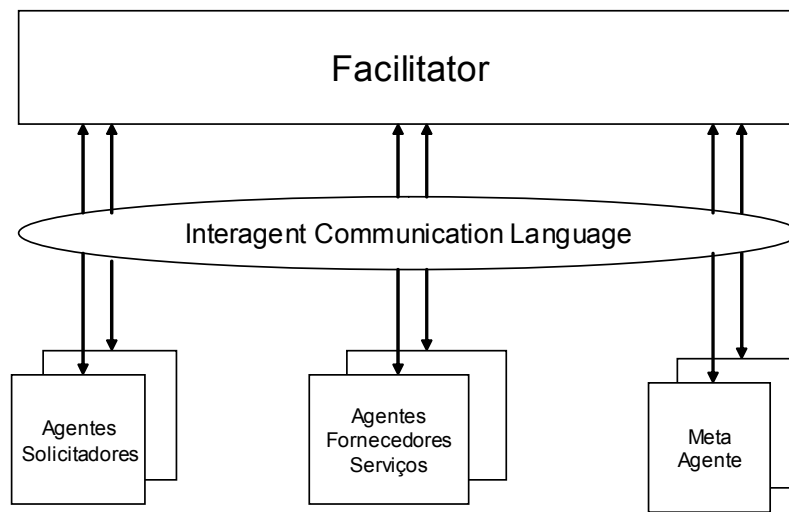


Figura 3.7: Estrutura de um Sistema OAA.

A cooperação entre agentes num sistema OAA é conseguida através da troca de mensagens, expressas numa linguagem comum, o Interagent Communication Language (ICL), já abordada na secção 3.2.2, e está normalmente estruturada em três fases: os fornecedores de serviços registam as suas capacidades no *Facilitator*; quem necessitar de requisitar serviços define os seus objectivos comunicando-os ao *Facilitator*; o *Facilitator* coordena o esforço dos fornecedores de serviços necessários à satisfação desses objectivos.

Cada agente define e divulga as suas capacidades, descrevendo os serviços que fornece e estabelecendo assim uma interface de alto nível, que é usada pelo *Facilitator* na comunicação e na delegação de pedidos de serviços ao agente. As capacidades são designadas por “*solvable*”, que podem ser procedimentais, implicando a execução de um determinado teste ou acção, ou de dados, implicando neste caso o acesso a dados. As trocas de mensagens entre agentes têm por base os *solvable* definidos por cada agente.

A noção de *Facilitator* é consideravelmente forte em três aspectos:

- Noção de delegação transparente: significa que um agente pode solicitar o serviço, sendo a sua satisfação coordenada pelo *Facilitator*, sem que o agente solicitador necessite de conhecer as identidades ou locais dos agentes que satisfazem o seu pedido;
- Tratamento de objectivos compostos, o que envolve três tipos de processamento:

- Delegação: determinação de quem (quais os agentes), e como, irá ser executado um objectivo composto;
- Optimização: incluindo a possibilidade de explorar o desenvolvimento de esforço paralelo entre os agentes fornecedores;
- Interpretação: envolve a coordenação dos pedidos aos agentes fornecedores, e sua combinação de forma coerente, para que seja enviada resposta ao agente solicitador;
- Possibilidade de recorrer a estratégias e aconselhamento dado pelo agente solicitador.

Contudo, é de notar que não é obrigatório que todos os pedidos e serviços passem pelo *Facilitator*, há suporte, na biblioteca de agentes, para pedidos endereçados e comunicações ponto a ponto.

De notar também, que é possível que um sistema seja configurado por forma a ter vários agentes *Facilitator*, passando a existir vários grupos *Facilitator*/agentes clientes, de modo a que este não se torne um gargalo nas comunicações e coordenação de todo o sistema.

Para a construção de agentes, a OAA fornece uma biblioteca, disponível em várias linguagens de programação, desde o C, C++, Java, e Prolog, entre outros.

Apresentam-se em seguida os passos necessários ao desenvolvimento de agentes OAA, ilustrados com a criação de um agente muito simples, responsável pelo análise a rede eléctrica, que indica se os contratos de venda de electricidade são ou não tecnicamente viáveis.

- Definir quais os serviços disponibilizados pelo agente;

```
// definição do serviço de analisar a viabilidade técnica dos contratos
agentSolvables = "[viabilidade(Local_orig, Local_dest, Energia, resp)]";
```
- Definir um procedimento para cada serviço disponibilizado pelo agente. Associado a cada serviço podem estar outros pedidos ao *Facilitator* ou a outros agentes, ou a utilização de outras aplicações associadas ao agentes, como por exemplo interrogações a bases de dados;

```
// definir procedimento que trata o serviço
boolean analisa_viabilidade(float quant, String orig, String dest){
    /* algoritmo de análise da rede e resposta quanto à viabilidade de
    fornecer a quantidade indicada do local origem até ao destino */
}
```
- Iniciar as comunicações com o *Facilitator*, através do procedimento `com_Connect`;

```
LibOaa myoaa = new LibOaa(new LibCom(new LibComTcpProtocol(), libComString));
```

```
if(!myoaa.getComLib().comConnect("parent", new IclStruct("tcp", new
IclStr("veiovis2"), new IclInt(3378)), (IclList)IclUtils.icl("[]")))
    System.out.println("Conexão falhou");
else System.out.println("Conectado!");
```

- Fazer o registo do agente e respectivos serviços no Facilitator, através do procedimento `oaa_Register`;

```
if(!myoaa.oaaRegister("parent", agentName, IclUtils.icl(agentSolvables),
(IclList)IclUtils.icl("[]")))
    System.out.println("Registo falhou");
else System.out.println("Registado!");
```

- Estabelecer procedimento associado a cada serviço disponibilizado pelo agente.

```
// indicar que o agente está pronto a "atender" pedidos de serviço
myoaa.oaaReady(true);

// "escuta" dos pedidos
myoaa.oaaRegisterCallback("oaa_AppDoEvent", new OAAEventListener(){
    public boolean doOAAEvent(IclTerm goal, IclList params, IclList answers){
        return oaaDoEventCallback(goal, params, answers);
    }
});

// análise dos pedidos
public boolean oaaDoEventCallback(IclTerm goal, IclList params, IclList answers){
    if(goal.iclStr().toString().equals("viabilidade"))
    {
        // analisar pedido e invocar o procedimento que o trata
        String Local_orig = goal.iclNthTerm(1).toString();
        String Local_dest = goal.iclNthTerm(2).toString();
        float Energia = Float.valueOf(goal.iclNthTerm(3));
        Boolean resp = analisa_viabilidade(Energia, Local_orig, Local_dest);

        // construir resposta ICL ao pedido
        answers.iclAddToList(new IclStruct ( "viabilidade", IclUtils.icl( Local_orig
), IclUtils.icl( Local_dest ), IclUtils.icl( Energia ), IclUtils.icl( resp )
) );
        return true;
    }
    else return false;
}
```

A plataforma OAA foi a plataforma seleccionada para o desenvolvimento do nosso trabalho, entre outros motivos, pelo facto de usar agentes, que podem ser escritos em diferentes linguagens de programação e executar em diferentes plataformas, facilitar a gestão da comunicação entre estes, permitir adicionar e/ou substituir dinamicamente agentes, e permitir que utilizadores humanos possam fazer parte da comunidade de agentes.

ZEUS

Trata-se de uma ferramenta que permite o desenvolvimento de aplicações multi-agente colaborativas [ZEUS, URL], desenvolvida pela equipa de investigação em Agentes Inteligentes da British Telecommunications Laboratories.

ZEUS define uma abordagem para o desenvolvimento de Sistemas Multi-Agente que é suportada por um ambiente visual através do qual o utilizador efectua a especificação dos agentes, sendo posteriormente gerado código Java para os agentes, de acordo com essas especificações. Suporta a linguagem FIPA-ACL, fornece ferramentas para desenvolvimento de ontologias, suporta vários mecanismos de coordenação entre agentes, fornece alguns agentes utilitários e permite que os agentes encapsulem sistemas pré-existentes. A comunicação entre os agentes é feita através de *sockets*, utilizando o protocolo TCP/IP.

A ferramenta ZEUS consiste numa série de componentes, escritos em linguagem de programação Java, que estão organizados em: Biblioteca de Componentes para Agentes, Software para Desenvolvimento de Agentes e Agentes Utilitários. A Biblioteca de Componentes para Agentes fornece um conjunto base de classes para construção dos agentes, que incluem aspectos relacionados com a comunicação, ontologia e coordenação dos agentes. Para facilitar o rápido desenvolvimento de aplicações multi-agente, o Software para Desenvolvimento de Agentes fornece um meio de desenvolvimento de aplicações que liberta o utilizador da complexidade da Biblioteca de Componentes para Agentes. Para tal fornece uma metodologia de criação de agentes, que guia o utilizador pelo processo de análise e desenvolvimento da sua aplicação, e que é suportada por um ambiente visual. Os Agentes Utilitários disponibilizados consistem em:

- *Nameserver*: mantém a identificação da sociedade de agentes;
- *Facilitator*: conhece as capacidades de cada agente, facilitando a descoberta de informação;
- *Visualiser*: agentes que podem ser usados para ver, analisar e testar sociedades de agentes.

Uma sociedade de agentes pode conter qualquer número de cada um destes agentes, no entanto é necessário que contenha pelo menos um *Nameserver*.

3.3 Negociação

Uma importante forma de interacção entre agentes é a negociação. A negociação é uma forma de tomada de decisão onde dois ou mais intervenientes pesquisam em conjunto o espaço de soluções possíveis para um dado problema, com o objectivo de atingirem uma solução comum e aceitável para as partes interessadas [Rosenschein e Zlotkin, 1994].

Os dois componentes fundamentais de um sistema de negociação automática são o protocolo de negociação e as estratégias de negociação [Lomuscio et al., 2003]. O protocolo de negociação define as regras de interacção entre os intervenientes. A estratégia de negociação é o plano de acção que um agente irá utilizar durante a negociação. É normal existirem várias estratégias para um mesmo protocolo de negociação, cada uma das quais podendo produzir resultados muito diferentes. Estratégias com bom desempenho num determinado protocolo de negociação poderão não ter tal desempenho perante outro protocolo. A escolha da estratégia de negociação depende, por isso, não só do cenário de negociação mas também do protocolo usado.

São vários os parâmetros a ter em conta na caracterização da negociação e definição de um protocolo de negociação. Na próxima secção abordam-se alguns desses parâmetros.

3.3.1 Caracterização

A negociação sustenta tentativas de cooperação e coordenação e é necessária quer em situações em que os agentes competem, quer quando são cooperativos.

- **Negociação Competitiva:** processo de tomada de decisão na resolução de conflitos, envolvendo duas ou mais partes, tendo em conta um único objectivo. A literatura em Teoria de Jogos [Neumann e Morgenstern, 1944] refere-se a este tipo de situações como “jogos de soma zero”, uma vez que neste tipo de situações o benefício de um é o prejuízo de outro, ou seja, o que um ganha é o que o outro perde. Este tipo de negociação é também denominado de negociação “*win-lose*”;
- **Negociação Cooperativa:** processo de tomada de decisão na resolução de conflitos, envolvendo duas ou mais partes, tendo em conta objectivos múltiplos, interdependentes, mas não necessariamente exclusivos. A literatura em Teoria de Jogos refere-se a este tipo de situações como “jogos de soma diferente de zero”, uma vez que neste tipo de situações, tenta-se que todas as partes envolvidas tirem alguma mais valia do processo. Este tipo de negociação é também designado de negociação “*win-win*”.

Espaço da Negociação

A definição do protocolo de negociação adequado depende de um conjunto de parâmetros que geram um espaço de cenários possíveis. De forma genérica, e tendo por base a classificação proposta em [Lomuscio et al., 2003], consideram-se os seguintes parâmetros: o número de participantes, o domínio e o objecto da negociação, as características dos agentes, os eventos, parâmetros de informação e de atribuição.

Número de Participantes

As interacções entre os agentes podem ser classificadas em função do número de agentes participantes em cada um dos dois lados da negociação. Assim, podemos ter:

- Negociação um-para-um: um agente negocia directamente com outro agente. Neste caso, na satisfação da necessidade de um agente, apenas existe um outro que é capaz de garantir tal satisfação;
- Negociação um-para-muitos: vários agentes negociam apenas com um outro agente. Neste caso, existem múltiplos agentes para satisfazer a necessidade expressa por um outro participante;
- Negociação muitos-para-muitos: vários agentes negociam simultaneamente entre si. É o processo mais complexo e como exemplo podemos referir o Leilão Duplo (ver secção 3.3.2.1).

Domínio da Negociação

Por domínio da negociação entende-se o conjunto de atributos sobre os quais os participantes irão negociar.

- Atributo único: neste caso o processo de negociação incide apenas sobre um atributo, sendo, habitualmente, o preço esse atributo;
- Múltiplos Atributos: o processo de negociação incide sobre vários atributos, por exemplo, e além do preço, datas de entrega, qualidade, garantias, etc. Nestes casos, normalmente recorre-se a uma função de avaliação que combina as utilidades do agente para cada um dos atributos.

Objecto da Negociação

O objecto da negociação é o item (produto, tarefa ou serviço) sobre o qual incide o processo de negociação. O objecto da negociação é não só caracterizado de acordo com a quantidade de itens a transaccionar mas também de acordo com o seu valor.

Relativamente à quantidade, a negociação pode ser:

- Item único: a negociação é feita relativamente à transacção de um único item;
- Múltiplos itens: a negociação incide sobre múltiplas unidades de um mesmo item;
- Combinação de itens: a negociação incide sobre um conjunto de vários itens de tipos distintos.

Os agentes avaliam os itens de forma diferente, tendo em conta se se trata de itens para uso privado ou se dependem da forma como os outros agentes os avaliam. Assim, tendo em conta o valor do objecto de negociação, esta poderá incidir sobre itens de:

- Valor privado: o valor do objecto de negociação é avaliado localmente, não depende do valor que os outros lhe possam atribuir;
- Valor público: o valor que o item possui para um participante depende do valor que os outros lhe possam atribuir. Estão neste caso, por exemplo, os itens que são adquiridos com vista a uma posterior revenda.

Características dos agentes

Os agentes são as entidades que participam no processo de negociação automática. Cada agente terá que avaliar os diferentes negócios e estabelecer as suas preferências. As suas características são:

- Papel: os agentes participantes de uma negociação podem ter um de dois papéis, o de contratante ou o de contratado. O contratante é o agente que fornece o objecto da negociação. O contratado é o que possui a capacidade para satisfazer os requisitos impostos pelo contratante. O contratante tanto pode assumir o papel de comprador como o de vendedor, depende apenas de qual foi o primeiro a desencadear a transacção. Em alguns cenários, por exemplo nos leilões, surge um outro papel, o de intermediário;
- Racionalidade: o agente deve ter interesse em participar na negociação, caso contrário, um agente racional não participará. A racionalidade do agente poderá ser perfeita, se tem conhecimento e recursos que lhe permitam analisar todos os cenários possíveis, ou limitada, situação mais comum;
- Conhecimento: os agentes detêm conhecimento sobre o item em negociação, podendo também deter conhecimento sobre os outros agentes e a forma como eles avaliam o mesmo, ou outros, itens;
- Acordo: podem ser estabelecidos vários tipos de acordos, por exemplo, que após uma oferta os agentes sejam obrigados a deixar de licitar para bens similares até receberem resposta da oferta inicial;
- Comportamento Social: os agentes podem actuar como entidades independentes interessadas apenas nos seus resultados, podem ser membros altruístas de uma sociedade, ou podem estar numa situação intermédia entre as duas. O seu comportamento social ditará também a possibilidade de virem a estabelecer coligações;
- Estratégia de negociação: determina de que forma o agente vai fazer e/ou aceitar ofertas, fazer contra-ofertas ou abandonar a negociação. Relaciona-se com outros parâmetros, nomeadamente no conhecimento, racionalidade e comportamento social do agente.

Eventos

O protocolo de negociação é influenciado pela forma como as ofertas, e outros eventos, ocorrem durante o processo de negociação. De facto, os eventos que se descrevem a seguir são parte importante na especificação do protocolo de negociação.

Podem-se distinguir:

- Validade da licitação: para serem válidas as licitações terão que ser colocadas dentro de determinados limites temporais e terão que respeitar algumas restrições;
- Visibilidade da licitação: apenas é relevante em negociações um-para-muitos e muitos-para-muitos. As licitações podem ser mensagens privadas entre agentes contratante e contratado, ou podem ser difundidas a todos os agentes;
- Escalonamento de atribuições e tempo limite: durante o processo de negociação podem ocorrer várias rondas, durante as quais o item em negociação é atribuído, temporariamente, até que se atinja o tempo limite para a negociação. Um mecanismo de negociação onde existem várias rondas é, por exemplo, o Leilão Inglês (ver secção 3.3.2.1).

Informação

Antes e durante o processo de negociação pode haver troca de informação, para além das licitações, entre os participantes. Algumas das mensagens úteis são:

- Cotações: cotações estabelecidas como resposta a prospecções efectuadas antes de se iniciar o processo de negociação, podendo fornecer informação vital e até reduzir a duração da negociação;
- Histórico das transacções: a informação relativa a transacções anteriores pode servir não só como garantia de credibilidade de um agente vendedor, mas, juntamente com a informação de cotações o histórico poderá também servir de suporte à negociação baseada em argumentação (ver secção 3.3.2.5);
- Argumentos: fornecem informação contextual que pode ajudar os agentes no seu processo de tomada de decisão.

Atribuição

Os parâmetros de atribuição dizem respeito à definição de qual o vencedor do negócio, no caso de haver vários agentes interessados no mesmo item. É particularmente relevante em leilões.

3.3.2 Mecanismos

O processo de negociação pode ser efectuado de diversas formas, desde leilões, protocolos baseados no Protocolo de Rede de Contrato, a argumentação, entre outros. Qualquer um deles pode ou não usar a tecnologia baseada em agentes inteligentes.

3.3.2.1 Leilões

Um leilão é um método de compra e venda de bens, que é baseado em competição [Agorics, URL]. Um leilão oferece uma forma simples de estabelecer o preço com base no mercado. Uma característica particular deste tipo de negociação é o facto de o preço não ser imposto pelos vendedores, mas pelos licitantes. No entanto, é o vendedor quem define as regras ao escolher o tipo de leilão a ser usado.

Existem diferentes tipos de leilão. A categorização de um leilão é feita de acordo com:

- Objecto da negociação: pode ser um item único, múltiplos itens iguais ou uma combinação de diferentes itens;
- Número de Participantes: pode ser um leilão de um-para-muitos (leilão simples), ou um leilão de muitos-para-muitos (leilão duplo);
- Visibilidade da Proposta: as propostas que se vão realizando podem ser do conhecimento de todas as entidades envolvidas (leilão aberto), ou podem ser apenas do conhecimento da entidade receptora (leilão fechado ou de propostas secretas).

O leilão é um paradigma muito conhecido e usado em vários sistemas de negociação automática [Fishmarket, URL] [MAGNET, URL] [Wurman et al., 1998]. A sua elevada aceitabilidade é explicada pela sua simplicidade e clareza, quer na compreensão das regras, como o facto de essas regras serem pré-definidas e conhecidas por todos os participantes, quer na sua computação. No entanto, os leilões têm algumas desvantagens como o facto de, normalmente, o leilão incidir sobre um único atributo do bem em transacção, ou, o facto de poderem surgir falsos compradores ou conluio.

Uma das formas de conluio será a constituição de grupos de licitantes que acordam em não fazer contra-propostas uns sobre os outros, de modo a que um deles fique com o item. Posteriormente fazem um leilão entre os membros do grupo, para decidir qual deles será o vencedor final, distribuindo os lucros obtidos por todos os membros do grupo. No entanto, há que ter em consideração que neste tipo de grupos surgem também problemas adicionais, como seja a possibilidade de algum membro não honrar compromissos assumidos com os outros membros, o que é particularmente arriscado em leilões de propostas secretas.

Leilão de item único

Os leilões de item único são dos leilões que mais frequentemente se encontram em mercados electrónicos. Existem vários tipos de leilões, tendo William Vickrey [Vickrey, 1961], estabelecido a taxonomia básica de leilões com base no modo como os preços são cotados e na maneira como as licitações são tratadas. Assim, estabeleceram-se quatro tipos de leilão:

- **Leilão Inglês:** é um leilão aberto de preço ascendente. O vendedor anuncia o preço base, a partir do qual são feitas propostas sucessivamente crescentes por parte dos compradores. O leilão termina quando existe apenas uma proposta, que ninguém está disposto a ultrapassar. O comprador que ofereceu a última proposta é o vencedor e deve pagar o valor anunciado. Uma característica deste tipo de leilão é que em qualquer altura cada agente sabe o valor do melhor negócio e o preço em que os outros desistiram do negócio;
- **Leilão Holandês:** é um leilão aberto de preço descendente. O vendedor anuncia um preço elevado, que vai diminuindo até que alguém aceite o negócio. Como tal, o primeiro e único negócio conclui a transacção. Este tipo de leilão é um jogo, em que cada licitante espera que o preço baixe, mas correndo o risco de ficar sem o produto pretendido caso outro licitante se antecipe. Uma proposta ao preço que o objecto de leilão tem para o licitante maximiza a probabilidade de obter o objecto mas com lucro zero. A possibilidade de lucro aumenta à medida que o preço vai baixando. Este tipo de leilão requer uma avaliação do mercado além da avaliação do objecto em leilão pelo licitante;
- **Leilão “Proposta Secreta de Primeiro Preço”:** trata-se de um leilão fechado, constituído por duas fases: uma primeira fase em que os licitantes fazem as suas propostas, desconhecendo as propostas dos seus concorrentes; e uma segunda fase em que as propostas são abertas e o vencedor determinado. A melhor proposta é que a tem direito a ficar com o objecto de leilão ao preço que propôs. Do ponto de vista dos licitantes, uma proposta elevada aumenta a probabilidade de ficar com o produto, mas diminui o lucro;
- **Leilão Vickrey:** leilão fechado, constituído por uma primeira fase em que os licitantes fazem as suas propostas, desconhecendo as propostas dos seus concorrentes, e uma segunda fase em que as propostas são abertas e o vencedor determinado. O licitante que fez a melhor proposta é quem tem direito a ficar com o objecto de leilão, e deve pagar o preço correspondente à segunda melhor proposta. Neste tipo de leilão, os licitantes não têm receio de ao fazer propostas mais elevadas pagarem um preço que é demasiado elevado em relação ao valor de mercado do produto, uma vez que o preço não é imposto pela sua proposta mas sim pelas propostas dos competidores. Licitantes mais

agressivos têm fortes probabilidades de ficarem com o produto mas pagando apenas um preço próximo do valor do produto no mercado.

Leilão de múltiplos itens

Quando o objecto de negociação são várias unidades de um mesmo item, e cada comprador apenas está interessado numa única unidade desse item, trata-se de um leilão de múltiplos itens. Neste caso, o mecanismo do leilão pode ser de dois tipos[Wurman et al., 1998]:

- Leilão simultâneo: são apresentados os m itens a ser vendidos, e cada participante faz a sua proposta. Uma vez terminadas as propostas, as m mais altas propostas são aceites a um preço uniforme igual ao da $m+1$ (primeira proposta rejeitada) proposta mais alta;
- Leilão sucessivo: neste tipo de leilão cada licitante tem que ponderar fazer uma proposta agressiva para o item actualmente em leilão, ou esperar até que o próximo item esteja disponível, na expectativa de ser mais baixo o preço. Neste caso a especulação está sempre presente excepto no último leilão. Para evitar complicações com a informação que possa ser inferida sobre o preço do item do primeiro leilão, o primeiro leilão é feito sobre as n propostas secretas dos licitantes. O preço do primeiro item é estabelecido com base no preço da melhor das $n-1$ propostas rejeitadas (Leilão Vickrey).

Leilão Duplo

Trata-se de um importante mecanismo de negociação, em que há competição quer por parte dos compradores quer por parte dos vendedores. Assim, vários vendedores e compradores submetem as suas propostas que são em seguida ordenadas da mais alta para a mais baixa, de modo a criar os perfis de procura e oferta. A partir desses perfis é feita a correspondência entre a procura e a oferta, começando nas ofertas de venda, da mais baixa para a mais alta, e nas de compra da mais alta para a mais baixa. Se a licitação de compra é superior à oferta de venda que lhe corresponde então é possível estabelecer-se a transacção.

Uma variação interessante deste tipo de leilão é o Leilão Duplo Contínuo, em que há várias transacções a ocorrerem em simultâneo, e a negociação não pára à medida que cada transacção vai sendo concluída.

Agentes e Leilões

Os agentes podem participar num leilão, seleccionado pelo utilizador, sendo responsáveis pelo processo de licitação. Neste caso, o agente usará uma estratégia, que poderá ter sido previamente escolhida pelo utilizador. Os agentes podem também ser úteis para seleccionar o leilão, para tal terão que ter conhecimento daquilo que o utilizador

pretende comprar, necessitando de uma ontologia que lhes permita perceber o que está a ser leilado e se corresponde ao pedido pelo utilizador.

Do ponto de vista das interações entre agentes, a negociação com base num mecanismo de leilão parece, à partida, simples. No entanto, apesar de a negociação num leilão exigir apenas aos agentes compradores que decidam qual o preço apropriado para estabelecer as suas licitações, e aos agentes vendedores, essencialmente que selecionem o mecanismo de venda mais adequado e o instante em que devem submeter os itens a venda, tais decisões, aparentemente simples, envolvem processos deliberativos complexos.

A complexidade deve-se sobretudo à quantidade de informação que os agentes têm que considerar para participar num leilão: outros participantes na negociação, quantidade de itens disponíveis, escassez e valor de mercado do item em negociação, histórico de preços e comportamento dos competidores, etc. No entanto, a elevada quantidade de informação não é a única fonte de complexidade neste domínio, mas também o facto de as condições estarem em constante mudança e sujeitas a incerteza: aparecem novos bens a transaccionar, os compradores aparecem e desaparecem, os preços modificam-se, nem as funções de utilidade dos outros participantes, nem os lucros que possam obter, são conhecidos, etc. Deste modo, para que um agente exiba um bom comportamento, o seu processo de tomada de decisão terá que ser elaborado, envolvendo informação procedimental (quando licitar e quando abandonar o leilão), informação e raciocínio sobre a oferta e a procura, o que por sua vez exige conhecimento e raciocínio sobre factores externos que possam afectar o leilão, conhecimento sobre necessidades e objectivos individuais, e avaliação das suas expectativas e dos seus rivais, o que, por outro lado, pode envolver conhecimento sobre as necessidades e objectivos de outros agentes.

Como tal, faz todo o sentido pensar nos leilões como um domínio adequado para explorar, definir e testar arquitecturas de agentes e táticas e estratégias de negociação.

3.3.2.2 Redes de Contrato

As Redes de Contrato são um mecanismo de negociação que se baseia no Protocolo de Rede de Contrato, proposto por Smith [Smith, 1980] e já descrito na secção 3.2.1. Com base na dinâmica de mercado, as redes de contrato têm como principais entidades o Consumidor (aquele que anuncia tarefas a serem executadas) e o Fornecedor (aquele capaz de executar as tarefas). Segundo a perspectiva do Consumidor, os passos envolvidos num mecanismo deste tipo são:

- Anunciar as tarefas a executar;
- Receber as propostas dos Fornecedores;
- Avaliar as propostas recebidas;

- Atribuir a execução da tarefa a um dos Fornecedores;
- Receber e analisar os resultados.

O Fornecedor, por sua vez, terá que atender aos seguintes passos:

- Recepção dos pedidos;
- Avaliação dos pedidos;
- Definição de uma resposta, se esta for possível;
- Execução da tarefa, se foi o Fornecedor seleccionado;
- Entrega dos resultados.

Alguns dos problemas a resolver neste tipo de mecanismo prendem-se com questões relacionadas com o facto de o protocolo base não detectar nem resolver conflitos, o facto do Consumidor não informar os Fornecedores cujas propostas não foram aceites, o facto de não prever interrupção de tarefas (para que tarefas mais críticas sejam resolvidas primeiro), e gerar comunicação intensiva.

Extensões ao Protocolo de Rede de Contrato contemplam a troca de propostas e contra-propostas para negociar o melhor acordo entre os agentes [Sycara, 1990], permitem a quebra unilateral dos contratos [Sandholm e Lesser, 1995], ou ainda o Protocolo de Rede de Contrato com Propagação de Restrições [Sousa e Ramos, 1999], que inclui uma fase de renegociação para tratamento de excepções e de alteração dinâmica de condições.

3.3.2.3 Teoria de Jogos

No âmbito da negociação automática entre agentes, as técnicas de Teoria de Jogos podem ser aplicadas quer na definição de protocolos de negociação, a que damos destaque nesta secção, quer a estratégias de negociação, que abordaremos mais à frente na secção 3.3.3.2.

O mecanismo de negociação baseado em Teoria de Jogos configura um processo de negociação iterativo, em que as partes envolvidas trocam propostas e contra-propostas entre si, visando atingir os seus objectivos ao custo mais baixo possível. Em qualquer iteração o agente propõe o acordo menos desfavorável para si nesse momento. No caso de não se chegar a um acordo a negociação prossegue, sendo que numa nova iteração os agentes não podem fazer propostas com utilidade superior à da iteração anterior, isto é, ou mantêm a mesma utilidade ou fazem uma concessão, baixando essa utilidade. Ou seja, basicamente é um processo iterativo em que cada uma das partes vai cedendo nas suas pretensões.

O processo é orientado por dois pré-requisitos: a informação deve ser total, isto é, sem ambiguidades, e a racionalidade perfeita, ou seja, os participantes dispõem de recursos

computacionais ilimitados e possuem informação completa sobre as suas opções de negociação e sobre as opções de negociação dos seus oponentes. No entanto, estes dois pré-requisitos tornam limitada a aplicabilidade deste tipo de mecanismos de negociação a contextos reais.

3.3.2.4 Aproximações Heurísticas

Os mecanismos baseados em Aproximações Heurísticas surgem como alternativa aos baseados em Teoria de Jogos, permitindo ultrapassar as suas limitações no que diz respeito à sua aplicabilidade em contextos reais. Nestes métodos considera-se que existe um custo associado à computação e tomada de decisão e o espaço de negociação é explorado de uma forma não exaustiva, tendo como efeito a obtenção de soluções boas em vez de óptimas [Jennings et al., 2001].

As principais vantagens destes métodos são:

- o facto de serem baseados em pré-requisitos realistas, permitindo uma base mais adequada à automatização e a sua aplicabilidade a um maior número de domínios;
- o facto de permitirem o desenvolvimento de arquitecturas de agentes, por parte de quem não está familiarizado com a Teoria de Jogos, usando modelos de racionalidade alternativos e com menos restrições.

A ideia central destes mecanismos é modelar a tomada de decisão dos agentes, durante o processo de negociação, através de heurísticas. As tácticas de negociação, apresentadas na secção 3.3.3.1, são uma das formas de representar heurísticamente o comportamento dos agentes.

3.3.2.5 Argumentação

Neste tipo de negociação os participantes fornecem argumentos que sustentam a sua posição. Assim, além de formular propostas e contra-propostas, o negociador pretende tornar as suas propostas mais atractivas, fornecendo para isso informação adicional na forma de argumentos. A natureza e tipo de argumentos pode variar, contudo, as categorias mais comuns incluem [Jennings et al., 1998b]:

- Castigos: a não aceitação da proposta por parte do agente a quem é dirigida, significa que algo de negativo lhe irá acontecer;
- Recompensas: a aceitação da proposta por parte do agente a quem é dirigida, significa que algo de positivo lhe irá acontecer;
- Apelos: a proposta é preferível a outras alternativas, por algum motivo.

Se às propostas, contra-propostas ou críticas estiver associada uma explicação, é mais provável que o acordo seja conseguido. A explicação é uma informação adicional que indica o porquê do envio dessa proposta, ou contra-proposta, e que permite ao agente [Rahwan et al., 2003]:

- Justificar as suas posições: um agente, tendo um forte motivo para tomar uma determinada posição, ao justificá-la, permitirá que o seu oponente compreenda as suas restrições e comportamento;
- Persuadir outros agentes: um agente tenta convencer o seu oponente da qualidade da sua proposta, construindo argumentos que a tornem mais atractiva.

Qualquer que seja a sua forma, o objectivo dos argumentos é o de modificar a região de aceitabilidade do agente a quem a proposta se dirige, ou a sua função de avaliação sobre essa região. Os argumentos têm o potencial de aumentar a probabilidade, ao persuadir os agentes a aceitarem negócios que poderiam à partida rejeitar, ou a velocidade, ao convencer os agentes a aceitar a posição do seu oponente sobre um determinado aspecto dos acordos (concluindo-se assim a negociação sobre ele).

A argumentação pode também ser vista como uma forma de evitar conflitos em Sistemas Multi-Agente. Em [Karunatilake e Jennings, 2004] é feita uma análise sobre a eficiência e eficácia da argumentação na resolução de conflitos, relativamente a outras alternativas, tais como, por exemplo, replaneamento.

Em [Novais, 2003] é proposta uma linguagem formal para a resolução de problemas que ocorrem em ambientes de Comércio Electrónico, e que se socorrem de atitudes como a pré-argumentação e a argumentação, como base para a construção de um argumento/contra-argumento.

3.3.3 Tácticas e Estratégias de Negociação

3.3.3.1 Tácticas

Alguns dos significados encontrados no dicionário para a palavra táctica são:

- a organização de meios de acção utilizáveis para obter os melhores resultados num jogo, empreendimento económico, social, político, etc;
- meios que se empregam para obter o resultado desejado.

No contexto da negociação entre agentes, as tácticas permitem gerar propostas e contra-propostas, para um componente do objecto de negociação, por exemplo o preço ou a quantidade, usando um único critério, que pode ser o tempo, um recurso, etc [Faratin et al., 1998]. As tácticas definem o comportamento do agente, no processo de negociação,

de uma forma heurística, e são classificadas por Faratin em três classes distintas: táticas dependentes do tempo, do recurso ou do comportamento.

A combinação pesada de diferentes táticas permitirá gerar contra-propostas abrangendo mais do que um critério. Por exemplo, para gerar uma contra-proposta baseada no tempo e no comportamento exibido pelo agente oponente, podem-se seleccionar duas táticas, uma da família das táticas dependentes do tempo e outra das táticas dependentes do comportamento, combinando-se depois os valores obtidos tendo em conta os pesos atribuídos a cada uma delas.

Táticas dependentes do tempo

Neste tipo de táticas o factor decisivo é o tempo. Assim, o valor de aceitação para um determinado aspecto depende do tempo que resta para finalizar a negociação. Se o agente tem uma determinada data limite para terminar o acordo, estas táticas modelam o facto de o agente estar disposto a fazer mais concessões à medida que essa data se aproxima. O que distingue as várias táticas pertencentes a este conjunto é a curva de concessão, que é função do tempo. Essa curva pode ser definida de variadas formas, por exemplo através de funções polinomiais ou exponenciais, no entanto, qualquer uma terá que ter em conta a gama de valores possíveis para a oferta, sendo que à medida que se aproxima a data limite a oferta tende a aproximar-se do preço limite.

Táticas dependentes do recurso

Os agentes realizam as suas propostas de acordo com a disponibilidade de um determinado recurso. Estas táticas modelam a pressão que a quantidade de recursos limitados, por exemplo o dinheiro, e de ambiente, por exemplo o número de clientes activos, impõe no comportamento do agente.

São táticas semelhantes às dependentes do tempo, com excepção de que o domínio da função é a quantidade de um recurso que não o tempo.

Táticas dependentes do comportamento

Esta família de táticas define as ofertas com base nas atitudes anteriores do agente ou dos agentes oponentes. Em situações em que o agente não está pressionado a conseguir um acordo, pode optar por usar táticas que imitam comportamentos, protegendo-se de ser explorado por outros agentes.

As táticas pertencentes a este conjunto distinguem-se na forma como imitam o comportamento, e até que ponto esse comportamento é imitado. Exemplos de táticas deste tipo são as que imitam o comportamento do oponente de forma proporcional, de forma absoluta ou através da média de um número de ofertas anteriores. De notar que este tipo de táticas apenas é aplicável em situações em que já há conhecimento suficiente sobre o comportamento do oponente.

3.3.3.2 Estratégias

Perceber as complexas interacções estratégicas entre agentes é cada vez mais importante, em vários domínios, nomeadamente no que toca ao desenvolvimento e estudo de Mercados, quer para quem projecta mercados, e pretende assegurar-se da estabilidade e eficiência económica dos mesmos, quer para quem projecta agentes, intervenientes nesses mercados, e deseja que estes sejam dotados de comportamento estratégico que maximize o seu lucro. A estratégia de negociação de um agente define a sequência de acções do agente ao longo do processo de negociação, ou seja, equaciona a forma de determinar o valor de ofertas e contra-ofertas [Fatima et al., 2001].

A estratégia a utilizar depende do conhecimento que o agente detém sobre o ambiente de negociação, particularmente no que diz respeito a flutuações da procura e ao comportamento dos seus competidores. Por vezes, a estratégia de um agente determina que combinação de táticas deve ser usada em cada instante. Em [Matos et al., 1998] é aplicado um algoritmo genético para determinar a melhor combinação de táticas aplicada a determinada situação. A aprendizagem neste caso é aplicada, de forma abrangente, aos pesos e aos próprios parâmetros das táticas.

A Teoria de Jogos é uma das áreas que estuda a formulação de estratégias óptimas em situações de conflito, considerando o impacto das estratégias dos outros nas estratégias e resultados do próprio agente. A Teoria de Jogos define um Jogo como sendo uma situação em que dois ou mais agentes de decisão, os Jogadores, interagem para obter o melhor dos retornos, tendo ao seu dispor um conjunto de opções, as estratégias. A cada combinação de estratégias é associado um retorno por jogador, sendo usual a construção de matrizes de retorno, a partir das quais é feita a análise do jogo e a selecção da estratégia a utilizar.

Os jogos podem ser jogos de soma igual a zero, quando a soma dos retornos de todos os jogadores é igual a zero, ou seja, o que uns ganham os outros perdem, ou jogos de soma diferente de zero, em que vários, ou mesmo todos os jogadores podem ganhar. Por exemplo, jogos de mercado são, habitualmente jogos de soma diferente de zero.

Os Jogos podem ainda ser caracterizados como cooperativos ou competitivos, como jogos únicos, só com uma iteração, ou jogos repetitivos, ou ainda como jogos de informação completa ou incompleta. Em jogos de informação completa não há informação privada, as jogadas possíveis e os retornos de cada jogador são do conhecimento comum.

A Teoria de Jogos assume a racionalidade de todos os jogadores, isto é, que cada jogador, dadas duas alternativas, irá seleccionar a que lhe dá um melhor retorno. Uma das implicações da racionalidade dos jogadores é que, o jogador irá sempre escolher a melhor resposta às estratégias dos outros jogadores, sendo que a melhor resposta é uma estratégia óptima. O equilíbrio de Nash corresponde ao conjunto de estratégias em que todos os jogadores jogam a melhor resposta em relação às estratégias escolhidas pelos

outros jogadores [Walsh et al., 2002]. Como tal, nenhum jogador tem incentivo para se desviar da estratégia escolhida, a não ser que os outros jogadores também se desviem.

Se por um lado, determinar o equilíbrio de Nash pode ser uma tarefa que exija demasiado esforço computacional, por outro lado, é irrealista considerar que os agentes têm conhecimento completo do ambiente de negociação, que lhes permita chegar a estratégias óptimas. O mundo real está cheio de incertezas: nem existe um conhecimento perfeito da procura de um bem ou serviço; nem é possível conhecer com exactidão o comportamento, e retorno associado, dos competidores. Assim, muitas vezes, as estratégias de mercado são baseadas em heurísticas, constituídas por acções, regras de decisão pré-definidas e/ou aprendidas e adaptáveis ao longo do tempo e às condições de mercado, que são função da informação a que o agente tem acesso [Walsh et al., 2002].

Vários são os autores que se têm dedicado à definição e ao estudo de estratégias para estabelecimento de preços em mercados. Alguns exemplos de estratégias dinâmicas para definição de preços são:

- *Goal-Directed*: É uma estratégia que se aplica a mercados finitos, em que o objectivo é garantir que todo o *stock* disponível é vendido até ao último instante em que é possível negociar, mas não antes. Os preços são ajustados de modo a baixarem quando a procura é pouca e subirem em alturas de maior procura. Com esta estratégia, à medida que se aproxima o fim da negociação são feitas alterações mais acentuadas ao preço [Morris, 2001];
- *Myopically optimal*: Trata-se de uma estratégia que usa o conhecimento sobre as características de procura dos compradores, bem como sobre os preços praticados pelos competidores, mas que não tem em consideração o comportamento estratégico desses competidores. Ou seja, assume que o preço praticado pelo competidores se mantém fixo. É então, com base nesse conhecimento, que é feita uma pesquisa exaustiva de qual o preço que maximiza o lucro esperado [Kephart et al., 1998];
- *Derivative-Following*: Esta estratégia pode ser usada na ausência de conhecimento sobre o comportamento dos competidores e sobre a procura de determinado item. Trata-se de uma estratégia em que os preços são alterados com base no lucro obtido anteriormente. Sempre que a alteração, aumento ou diminuição, feita ao preço se repercutir num aumento do lucro a alteração mantém o mesmo sentido (continua a aumentar ou diminuir), caso contrário altera o sentido (passa a diminuir o preço se o tinha aumentado e a aumentá-lo se o estava a diminuir) [Greenwald e Kephart, 1999] [Kephart et al., 2000];
- *Zero-Intelligence-Plus*: Esta estratégia foi proposta para mercados cujo mecanismo de negociação é o leilão duplo contínuo e para ultrapassar as

limitações das experiências relatadas em [Gode e Sunder, 1993], por Dave Cliff [Cliff, 1997] e mais tarde modificada por [Tesauro e Das, 2001]. Nesta estratégia os agentes usam informação do mercado para ajustar a sua margem de lucro. Os agentes alteram a margem de lucro com base no preço que propuseram, se a sua proposta foi ou não aceite, e qual foi o preço da última transacção efectuada no mercado. Inicialmente os agentes licitam no sentido de obterem um elevado lucro, ajustando depois as suas licitações no sentido das transacções que vão sendo estabelecidas.

3.4 Conclusões

Neste capítulo fez-se uma abordagem à computação baseada em Agentes e em Sistemas Multi-Agente. Estas entidades são vistas como entidades que revelam um comportamento próprio quando inseridas num determinado ambiente, e que coordenam as suas próprias acções com base em conhecimento formal sobre a dinâmica dessas mesmas acções e as suas consequências, quer sobre o ambiente onde estão inseridas, quer sobre as outras entidades que fazem parte desse mesmo ambiente.

Um Sistema Multi-Agente revela-se um paradigma adequado à representação de um Mercado Eléctrico. Num Mercado de Energia Eléctrica as várias entidades intervenientes, desde a geração da energia ao seu consumo final, são entidades que estão naturalmente distribuídas, possuindo cada uma os seus próprios objectivos e comportamento, tendo no entanto que interagir a diversos níveis, que vão desde as interacções comerciais com vista ao fornecimento de electricidade, ao assegurar do correcto funcionamento dos Sistemas Eléctricos, com as suas características e restrições próprias.

Neste trabalho propomos aplicar a tecnologia dos Agentes Inteligentes e Sistemas Multi-Agente à simulação dos Mercados Eléctricos, passando, no próximo capítulo, a uma justificação e análise mais detalhada da forma de o conseguir fazer.

Sistemas Multi-Agente Aplicados a Mercados de Energia Eléctrica

Este capítulo começa por analisar os requisitos e desafios que as entidades envolvidas nos novos Mercados Eléctricos enfrentam, e de que forma a tecnologia dos Agentes e Sistemas Multi-Agente é aplicável e vantajosa neste contexto. São ainda descritas algumas aplicações ilustrativas da utilização de Agentes e Sistemas Multi-Agente neste contexto.

Introdução

O processo de reestruturação do sector eléctrico coloca diversos desafios exigindo a alteração de modelos conceptuais que têm dominado o funcionamento do sector. Com a reestruturação o mercado torna-se mais aberto e competitivo, mas também mais complexo, colocando aos intervenientes novos desafios. A crescente complexidade e imprevisibilidade da evolução do mercado torna cada vez mais difícil a tomada de decisões. Deste modo, as entidades intervenientes vêm-se forçadas a repensar o seu comportamento e as suas estratégias de mercado.

Para enfrentar os novos desafios torna-se fundamental a utilização de ferramentas que suportem a tomada de decisão, nomeadamente aquelas que permitam às entidades analisar a evolução do mercado e testar acções alternativas, constituindo assim uma mais valia importante.

Quais os principais desafios que se colocam, no âmbito da reestruturação do sector, às entidades dos mercados de electricidade? Que tipo de ferramentas de apoio à decisão lhes poderão ser úteis? De que forma podem os Agentes ser utilizados e contribuir para o estudo e evolução dos mercados de electricidade? Existem soluções que sustentam a sua aplicabilidade? Que tipo de soluções já existem?

São estas algumas das questões a que este capítulo pretende dar resposta.

Para tal, iniciamos o capítulo com uma breve análise dos problemas e desafios que se colocam às entidades intervenientes nos mercados eléctricos, incidindo esta análise mais particularmente nos desafios que se lhes colocam em termos de transacções comerciais, uma vez que esta é a área para a qual se pretende dar um contributo com o presente trabalho.

Analisaremos de que forma e qual o papel que os Agentes e a Simulação Multi-Agente podem desempenhar numa ferramenta de apoio à decisão que permita às entidades do sector avaliar sobre as opções de negócio de que dispõem, e, consequentemente, quais as que melhores vantagens lhes oferecem.

O capítulo termina com uma descrição de alguns dos trabalhos que têm surgido neste âmbito e que atestam bem as potencialidades que este tipo de tecnologia apresenta nesta área de aplicação.

4.1 Requisitos e Desafios

São várias as questões que se colocam no âmbito dos mercados eléctricos reestruturados, sendo por isso bem vindo o desenvolvimento de aplicações de análise e apoio à decisão.

Por um lado, são múltiplas as questões relativas ao relacionamento comercial entre as diversas entidades. Por outro lado, são cada vez mais complexas as questões de ordem técnica que se prendem com a operacionalidade do sistema eléctrico, nomeadamente no que diz respeito às redes de transporte e distribuição.

O relacionamento comercial entre as várias entidades tem sofrido alterações significativas. Não só pelas diferentes regras que actualmente regem os mercados, como, por exemplo, o aparecimento dos chamados mercados bolsistas ou em Bolsa, mas também com a alteração do papel de algumas entidades e o aparecimento de outras.

Assim, ao nível do relacionamento comercial importa estudar e comparar os diversos mecanismos de mercado que foram surgindo, desde os modelos de mercado em Bolsa, como o Mercado Assimétrico e Simétrico, aos modelos baseados em Contratos Bilaterais e aos modelos Mistos [Shahidehpour et al., 2002]. O estudo dos vários modelos de mercado passa não só pela análise e avaliação das suas regras de funcionamento, nomeadamente face a diferentes cenários de oferta e procura, mas também pela análise da sua evolução em diferentes contextos estratégicos, isto é, tendo em conta diferentes comportamentos por parte das entidades de mercado.

Relativamente às causas de evolução do comportamento estratégico das entidades intervenientes no mercado, convém realçar as que resultam da passagem de um regime essencialmente monopolista para a implantação de mecanismos de mercado, onde o comportamento tem que ser repensado e substancialmente alterado.

Assim, as entidades produtoras de electricidade, que em muitos casos detinham um monopólio local, regional ou mesmo nacional, ao planearem o seu funcionamento e ao definirem a sua estratégia de mercado, terão que continuar a ter em consideração a procura prevista e considerar agora, além disso, a presença e comportamento de outras entidades produtoras que com elas passaram a poder competir. A este nível, ferramentas que permitam a simulação de várias estratégias, num ambiente que inclua a presença de entidades competidoras, com o seu próprio comportamento estratégico, face a vários cenários de procura e diferentes modelos de mercado, são muito úteis para que possam lidar com as novas regras de mercado, mantendo-se competitivas.

Acresce que, com a reestruturação do sector eléctrico os consumidores passam a poder escolher a entidade com a qual se desejam relacionar do ponto de vista comercial e

técnico. Deste modo surgem decisões que anteriormente estavam limitadas. Algumas dessas decisões dizem respeito a:

- avaliação dos diversos tipos de contrato que os consumidores podem vir a estabelecer, por exemplo, ao decidirem optar pelo estabelecimento de um Contrato Bilateral físico, o que implica a escolha directa do fornecedor, ou ao decidirem participar no mercado em Bolsa, no caso de um mercado baseado num modelo Misto;
- critérios a considerar na escolha do fornecedor, no caso dos Contratos Bilaterais, tais como, por exemplo, o preço ou a qualidade de serviço;
- avaliação da oferta de serviços de valor acrescentado, uma vez que no contexto dos mercados reestruturados tem surgido a oferta deste tipo de serviços, para além da simples transacção de energia eléctrica;
- gestão de cargas, tendo em conta previsões da evolução do preço de mercado.

Dada a diversidade de opções de que os consumidores passam a dispor, uma ferramenta que lhes permita analisar o mercado, considerando as várias entidades com quem podem estabelecer contratos, a evolução do preço de mercado, e outras variáveis de interesse como a qualidade de serviço e serviços de valor acrescentado, permitir-lhes-á tomar decisões mais sustentadas.

Como já foi referido no capítulo 2, com a reestruturação dos mercados eléctricos surgiram novas entidades, nomeadamente relacionadas com a comercialização da electricidade. Também a estas entidades interessa uma ferramenta que lhes permita analisar e estudar o mercado, tendo em conta as entidades presentes, os consumos previstos, a previsão dos preços de mercado, entre outros aspectos, sendo assim bastante útil para que as mesmas possam definir com maior rigor a forma mais vantajosa de actuar no mercado.

Com o aparecimento de novas entidades, as formas de relacionamento entre produtores e consumidores foram substancialmente alteradas. Assim, e à medida que os limites de elegibilidade vão diminuindo, são cada vez mais os consumidores com a possibilidade de actuar no mercado. Os consumidores poderão ainda ser representados por intermediários, por exemplo através de Agregadores. A avaliação destes cenários alternativos é importante para as várias entidades de mercado, desde os fornecedores aos consumidores, passando pelas diferentes entidades intermediárias que passaram a existir, pelo que todos têm a beneficiar com o aparecimento de ferramentas que permitam analisar o mercado sobre várias perspectivas e cenários.

O sistema eléctrico é um sistema com as suas especificidades, que decorrem essencialmente do facto de a energia eléctrica não se poder armazenar em quantidades significativas e ainda devido à especial circunstância das actividades de rede se manterem

a funcionar como monopólios, tal como referido no capítulo 2, não podendo, por isso, ser encarado como qualquer outro tipo de mercado competitivo. A integração da gestão do sistema eléctrico físico com as actividades de natureza comercial deverá ser um factor a considerar numa ferramenta que pretenda analisar o mercado eléctrico de forma abrangente. É por isso importante que seja possível analisar de que modo os despachos determinados em função de variáveis e critérios económicos, resultantes das transacções comerciais previstas, vão poder ser ou não implementados, de modo a assegurar o funcionamento do sistema eléctrico em condições fiáveis e seguras do ponto de vista técnico. Para tal, deve ter-se em conta as restrições que resultam do limite de capacidade do sistema eléctrico e deve-se verificar ainda a existência de possíveis congestionamentos nas redes.

As actividades relacionadas com a exploração, manutenção e expansão das redes eléctricas – independentemente do nível de tensão – correspondem, antes de mais, a serviços disponibilizados a diversos utilizadores. O mercado não está, tal como já foi referido, presente nestas actividades, não existindo, portanto, condições de concorrência. Neste âmbito, são claramente importantes a abordagem de aspectos tarifários por uso das redes, as questões de reciprocidade nas condições de acesso ao sistema produtor e ao sistema de transporte, as condições de elegibilidade, o estabelecimento de padrões comparáveis de qualidade de serviço, e todos os aspectos relacionados com a actividade de regulação do sector eléctrico. Na perspectiva das entidades responsáveis pela actividade de regulação do sector eléctrico, a utilidade de uma ferramenta de análise do mercado prende-se essencialmente com a possibilidade de analisar e comparar diferentes alternativas, sob os vários aspectos supra citados.

Os Mercados Eléctricos nem sempre satisfazem os critérios ideais de um mercado perfeito. A excessiva concentração de meios de produção em algumas empresas, a assimetria de informação disponível às diversas entidades, a capacidade limitada de geração, as restrições no sistema de transporte, a dificuldade em armazenar grandes quantidades de energia, para posterior utilização em momentos onde os consumos são maiores, são entre outras, algumas das situações que, por vezes, podem levar a que haja condições para que algumas entidades possam exercer vantagem relativamente a outras, ou seja, situações em que determinadas entidades possam exercer poder de mercado. Por exemplo, podem surgir situações em que algumas empresas de produção de electricidade possam exercer maior poder de mercado, fazendo subir os preços, devido a questões relacionadas com restrições e congestionamentos nas redes. Tais situações são de evitar, não só pela subida de preço que normalmente implicam mas pela diminuição da competitividade.

A possibilidade de analisar e detectar previamente, através de uma ferramenta de análise do mercado, qual a probabilidade e quais as empresas que mais facilmente poderão criar situações como a referida a título de exemplo, ou quaisquer outras que se

premam com o tirar partido das características do mercado para exercer poder de mercado, é bastante importante no sentido de evitar abusos de poder, por um lado, e no sentido de promover o seu funcionamento competitivo, por outro lado.

Em resumo, pretende-se que uma ferramenta de apoio à decisão aplicada ao contexto dos mercados eléctricos permita analisar aspectos tais como

- diferentes mecanismos de mercado;
- diferentes estratégias de actuação por parte das várias entidades do mercado;
- cenários alternativos;
- gestão de cargas;
- congestionamentos e a operacionalidade das redes;
- tarifários alternativos;
- a possibilidade de surgirem situações de poder de mercado por parte de algumas entidades.

Que tipo de ferramentas poderão ser úteis neste contexto?

4.2 Apoio à Decisão no Estudo dos Mercados de Electricidade

Um sistema de apoio à decisão deve ser um sistema interactivo, flexível e adaptável, desenvolvido com o objectivo de suportar a análise de problemas não estruturados de forma a melhorar a tomada de decisões [Turban et al., 1998]. O objectivo não é fornecer aos utilizadores um meio de encontrar soluções óptimas para os seus problemas, mas antes fornecer-lhes uma ferramenta que lhes permita fazer diversos tipos de análises, avaliando as suas consequências, de forma a que possam tomar as suas decisões de forma mais sustentada.

A simulação é uma técnica muito útil para adquirir conhecimento e realizar experiências sobre um sistema, permitindo avaliar acções e cenários alternativos e a evolução futura do sistema [Law e Kelton, 1991].

O recurso a técnicas de simulação é, regra geral, bem mais vantajoso em termos de custo e risco que a experimentação no sistema real. Não só por ser mais dispendioso repor o estado inicial de um sistema, mas também por, na maioria das vezes, as decisões tomadas provocarem alterações irreversíveis ao sistema, sendo impossível repor o estado inicial de modo a que sejam testadas decisões alternativas.

A simulação permite o estudo de um sistema de forma controlada pelo utilizador. Será o utilizador a seleccionar as variáveis a serem alteradas e de que modo elas serão alteradas, o que lhe permite fazer uma análise da sensibilidade do sistema a diversos factores.

O investigador poderá testar diversas combinações de políticas internas e externas ao sistema, que poderão nunca chegar a conjugar-se na realidade, ou pelo menos num curto espaço de tempo, permitindo-lhe uma melhor percepção e aprendizagem sobre o comportamento do sistema. O facto de ser possível testar o estado do sistema face a situações que possam vir a ocorrer, avaliando o seu desempenho futuro, é uma mais valia para qualquer entidade, que deste modo estará, com certeza, mais preparada para as enfrentar.

No entanto é necessário algum cuidado no desenvolvimento de um estudo de simulação, uma vez que a simulação é uma técnica que não nos dá soluções óptimas, mas apenas permite analisar os resultados de uma configuração possível do sistema. Sendo que, para tal, é muito importante que o modelo de simulação seja uma representação fiel do sistema em análise, caso contrário as conclusões tiradas serão desajustadas e não aplicáveis a esse sistema. Por esse motivo, antes de desenvolver qualquer estudo de simulação é fundamental analisar e especificar adequadamente o modelo do sistema que se pretende estudar.

Pelas características citadas, a simulação revela-se uma componente importante de um Sistema de Apoio à Decisão que permita aos intervenientes do mercado eléctrico estudar e analisar as suas decisões. A utilização de técnicas de simulação numa ferramenta de apoio à decisão, que tenha em consideração os requisitos e desafios que se colocam às entidades de mercado e que foram sucintamente abordados, permitirá o estudo e análise dos novos mercados eléctricos tendo em conta vários cenários.

Que tipo de simulação será adequado utilizar? Que modelo de simulação?

4.2.1 Sistemas Multi-Agente

Em [Jennings e Wooldridge, 1995] é analisada a motivação para o uso da tecnologia multi-agente sob duas perspectivas:

- a capacidade de resolução de problemas que até então não eram estudados de forma computacional, ou porque não existia tecnologia adequada ou porque era demasiado caro desenvolver soluções através da tecnologia pré-existente;
- a capacidade de resolver melhor os problemas, por se tratar de uma forma mais natural, fácil, eficiente ou rápida de o fazer.

Relativamente à primeira perspectiva, os problemas para os quais a tecnologia multi-agente vem trazer mais valias, podem ser caracterizados como problemas com as seguintes propriedades:

- Abertura: quando os componentes do sistema não são conhecidos à partida, podem variar ao longo do tempo ou são bastante heterogéneos;
- Complexidade: quando o domínio é alargado, sofisticado, ou imprevisível, no sentido de que a melhor forma de ser abordado é através do desenvolvimento de componentes especializados em determinados aspectos, necessitando, neste caso, os agentes de interagir de forma a assegurar que as suas dependências são geridas de forma adequada.

Relativamente à segunda perspectiva, as características fundamentais dos sistemas prendem-se com:

- A distribuição de dados, controlo, conhecimento ou recursos: quando o domínio envolve um certo número de entidades que estão física ou logicamente distribuídas e que necessitam de interagir umas com as outras. A tecnologia multi-agente constitui uma forma natural de modelizar o problema;
- A possibilidade de integração de aplicações pré-existentes, por exemplo, como funcionalidades de um agente.

Os sistemas de energia eléctrica são precisamente um dos domínios para o qual os sistemas multi-agente se revelam adequados, tal como é também referido em [Jennings e Wooldridge, 1995]. O uso da tecnologia multi-agente revela-se adequado por uma série de factores que se prendem essencialmente com as motivações apresentadas acima, e com as vantagens no que diz respeito ao estudo de sistemas distribuídos, que foram já abordadas no capítulo 3.

Existem já várias aplicações que comprovam a aplicabilidade dos Sistemas e da Simulação Multi-Agente no estudo de diversos aspectos relacionados com os mercados em geral. Por exemplo, em [Viamonte et al., 2004a] e [Viamonte et al., 2004b], propõe-se um simulador para análise de várias estratégias que os agentes podem usar num ambiente de Comércio Electrónico do tipo Empresa com Consumidor.

O tipo de ferramentas que mais se relaciona com o nosso trabalho são, no entanto, as que simulam as transacções comerciais no mercado eléctrico através de agentes interactuantes, pelo que lhes será dado especial destaque.

Referem-se ainda outro tipo de trabalhos que mostram a variedade de contextos em que a tecnologia multi-agente pode ser aplicada, no âmbito dos sistemas eléctricos. Alguns desses trabalhos são o Iberdrola-Archon e o Homebot, que se descrevem já em seguida.

Iberdrola - ARCHON

Foi desenvolvida pela Iberdrola uma aplicação para gestão de uma rede de transporte que tem por base a arquitectura *ARchitecture for Cooperative Heterogeneous ON-line systems* (ARCHON).

ARCHON fornece uma plataforma de software descentralizada [Cockburn e Jennings, 1996] [Jennings et al., 1996] que permite a integração de diferentes entidades computacionais, os agentes, com sistemas pré-existentes, e uma metodologia que ajuda a estruturar essas interações. Os agentes interagem, cooperando e comunicando uns com os outros, de modo a atingirem os seus objectivos individuais e resolverem o problema global da aplicação de que fazem parte.

A gestão de uma rede de transporte é uma actividade complexa que envolve um número de sub-tarefas, tais como: monitorizar a rede, detectar distúrbios, determinar a causa, localização e tipo de distúrbio, planear e fazer manutenção para que a rede volte a estabilizar, etc.

Utilizando o sistema ARCHON foi desenvolvida pela Iberdrola uma aplicação multi-agente que envolve sete tipos de agentes, dois dos quais encapsulam sistemas pré-existentes, que interagem no sentido de detectar, diagnosticar e reparar falhas na rede [Corera et al., 1996].

HOMEBOT

O sistema HOMEBOT é um sistema em que as cargas eléctricas são geridas por agentes autónomos que comunicam e negociam no mercado eléctrico de modo a otimizar o uso da energia eléctrica [Ygge et al., 1996][Ygge et al., 1999].

Cada carga está equipada com um agente de software que actua como seu representante. É da responsabilidade de cada agente fazer o melhor uso da electricidade ao mais baixo preço, o que pode ser conseguido, por exemplo, ao deslocar o período de consumo para períodos em que o preço é mais baixo. Tal, evidentemente, vai depender do tipo de carga em questão, já que, por exemplo, não convém desligar um forno eléctrico ou um micro-ondas a determinadas horas, mesmo que tal implique consumo de energia a preço mais elevado, ao passo que, por exemplo, máquinas de lavar são cargas que facilmente poderão ser deslocadas.

Os agentes utilizam uma função de utilidade para modelar as suas necessidades e preferências. Esta função tem em conta as preferências do consumidor, o estado das cargas, as previsões de consumo e as características físicas das cargas. Cargas que não podem ser deslocadas são representadas por agentes insensíveis ao preço.

Este sistema foi testado na Suécia, tendo os testes realizados demonstrado também que é possível que os agentes comuniquem em tempo real através da rede eléctrica.

4.2.1.1 Mercado de Energia Eléctrica

O Mercado de Energia Eléctrica é um mercado em que as entidades são heterogêneas e estão naturalmente distribuídas, tendo cada uma os seus objectivos e comportamento.

A representação de cada uma das entidades do mercado através de um agente de software, que detém conhecimento sobre a própria entidade, bem como sobre o modo como esta vê o mercado e as estratégias de actuação neste, permitirá definir uma comunidade de agentes concorrentes, capazes de competir e cooperar, simulando o comportamento do mercado, e permitindo a sua análise dinâmica.

Dado o contexto de reestruturação ser muito recente e continuar ainda em evolução, veja-se o exemplo de Portugal, abordado na secção 2.3, os mercados eléctricos apresentam características que podem variar ao longo do tempo. Assim, podem surgir novas entidades, com novos papéis no mercado; pode haver alteração do papel de algumas entidades; pode haver alteração dos regulamentos, etc. Características estas que facilmente poderão ser integradas num modelo multi-agente, através da inclusão de novos agentes ou da alteração das características, como os objectivos, necessidades, comportamento, entre outras, de agentes já existentes, sem que tenha que ser reformulado todo o sistema.

Um aspecto que também é importante é a vantagem que os Sistemas Multi-agente apresentam relativamente à inclusão de ferramentas previamente existentes. Tal facto é relevante na medida em que ferramentas, como por exemplo as de análise de trânsito de potências, já existentes no contexto dos mercados monopolizados, poderão ser integradas num modelo multi-agente e, deste modo, reaproveitadas.

4.2.1.2 Simulação Baseada em Agentes

A simulação baseada em agentes permite analisar a dinâmica de um sistema, constituído por entidades heterogêneas, analisar o comportamento das mesmas e a sua evolução. A simulação baseada em agentes é uma nova abordagem à simulação de sistemas. São simulados os processos de decisão e as acções dos agentes, além de se analisar o comportamento do sistema de forma agregada [Gilbert e Troitzsch, 1999].

Na simulação multi-agente, os aspectos físicos e comportamentais são representados através de um sistema de agentes que interagem. Cada agente tem as suas próprias regras de comportamento e tomada de decisão que têm em consideração o ambiente onde estão inseridos.

Apesar de as tradicionais ferramentas de simulação continuarem a ser úteis em variados contextos, mesmo no que toca ao estudo dos mercados eléctricos, são mais limitadas na sua habilidade em adequadamente reflectir a diversidade de entidades participantes nos novos mercados eléctricos, cada qual com as suas estratégias de

negócio, preferências, sensibilidade ao risco e processos de decisão. A simulação baseada em agentes tem vantagens em termos de realismo, inclusão de efeitos de aprendizagem, e heterogeneidade das várias entidades.

A simulação baseada em agentes é uma forma promissora de modelar o mercado de energia eléctrica de forma a melhor se compreender os seus princípios e mecanismos. As entidades dos mercados eléctricos serão representadas através de agentes heterogeneos que interagem tendo em conta as regras de mercado.

Com uma ferramenta baseada em simulação multi-agente é possível analisar o mercado eléctrico sob várias perspectivas. Por um lado, e mantendo um modelo de simulação com as mesmas entidades, é possível fazer uma análise ao funcionamento dos vários modelos de mercado, já descritos no capítulo 2, o que permitirá aumentar o conhecimento sobre o funcionamento de cada tipo de modelo.

É também possível alterar o modelo de simulação, acrescentando e/ou retirando entidades ou alterando o comportamento das entidades já definidas, o que permitirá, por exemplo, para um mesmo modelo de mercado analisar de que modo este é sensível a determinados parâmetros, como sejam variações na procura, diferentes estratégias de definição de preço, congestionamentos nas redes, etc.

Particularmente importante, é a utilidade que uma ferramenta de simulação pode trazer às entidades intervenientes, uma vez que ao permitir-lhes analisar o impacto das suas decisões sob várias perspectivas, permite-lhes: aumentar o seu conhecimento sobre as regras do mercado; definir e testar novas estratégias de actuação; analisar quais as estratégias mais adequadas a utilizar em cada caso; ou seja, permite-lhes definir qual o comportamento mais adequado a cada situação.

4.3 Simuladores Multi-Agente de Mercados de Electricidade

Nesta secção iremos descrever algumas das ferramentas baseadas em simulação multi-agente para estudo dos mercados eléctricos num contexto de competitividade, realçando os seus pontos fortes e apontando as suas fragilidades.

Começamos por descrever alguns simuladores de âmbito genérico, que mais directamente podem ser comparáveis ao nosso trabalho, passando por fim a descrever trabalhos de âmbito mais restrito, por se dedicarem ao estudo de um tipo de mercado, ou mecanismo de mercado, em particular.

4.3.1 Auction Market Simulator

O simulador Auction Market Simulator (AMS) foi desenvolvido no âmbito de um projecto liderado pelo Professor Gerald Sheblé, para o Electric Power Research Institute [EPRI, URL], estando disponível em [Sheblé, URL] uma versão que data de 1997.

Introdução

Utiliza agentes adaptativos para simulação de um leilão duplo de compra e venda de energia eléctrica. A adaptação dos agentes é conseguida através da utilização de um algoritmo genético, que impele os agentes a maximizarem localmente o seu lucro num ambiente em que vendedores e compradores estão a alterar as suas ofertas. A produção, procura, custos variáveis e fixos, e os custos de transporte permanecem fixos.

Estrutura do Simulador

Existem dois tipos principais de participantes: compradores e vendedores, além de um agente central mediador dos negócios.

Tanto compradores como vendedores têm uma quantidade de energia eléctrica, para compra ou venda, que se mantém fixa.

Cada comprador e vendedor tem associado um local na rede, que é usado para determinar a possibilidade de transporte de energia entre compradores e vendedores, tendo em conta a capacidade das linhas entre as várias localizações. A rede de transporte é simplificada através do recurso a uma matriz de capacidade remanescente de transporte entre localizações.

Uma vez feitas as ofertas de compra e venda por parte dos agentes, a associação entre vendedores e compradores é feita enquanto o preço oferecido exceder o preço pedido, e a energia é vendida ao preço médio entre a oferta e a procura. O mediador de negócios faz a correspondência entre compradores e vendedores ordenando as ofertas inversamente, ou seja, a compra mais elevada é associada à venda mais baixa.

Depois o mediador verifica se a transacção pode ocorrer, com base na capacidade de rede disponível entre comprador e vendedor. Se existe capacidade suficiente então a transacção é efectuada e a matriz que reflecte a capacidade remanescente de transporte é actualizada para reflectir o fluxo actual. Em seguida, os próximos comprador e vendedor da lista são associados. O preço da transacção é sempre feito ao preço médio das duas ofertas (compra e venda).

Conclusões

É possível aceder a um ficheiro executável que permite utilizar a aplicação. A aplicação consiste em vários menus e janelas, de fácil utilização, através dos quais é possível parametrizar o número de agentes vendedores e compradores, e as suas características, como a quantidade de energia a transaccionar e os custos. Permite definir a capacidade

da rede de transporte entre os vários agentes, e parametrizar o algoritmo genético associado aos agentes compradores e vendedores, sendo também possível alterar o gene associado a cada agente.

Este sistema fornece vários gráficos de resultado, embora os resultados estejam agregados em duas curvas, uma que representa os resultados dos compradores e outra os dos vendedores.

Apesar de ser possível fazer uma série de análises interessantes, como incluir restrições na rede de transporte, seleccionar alguns compradores para serem mais caros ou terem mais capacidade do que outros, entre outras, torna-se difícil analisar o comportamento individual dos agentes.

Como principais limitações apontam-se o facto de apenas permitir simular mercados eléctricos cujo mecanismo de negociação é o leilão duplo, e de os valores de procura e capacidade de produção se manterem fixos ao longo da simulação. Trata-se no entanto de uma aplicação muito interessante e que vem atestar a aplicabilidade de sistemas multi-agente ao estudo dos mercados eléctricos.

4.3.2 Auction Agents for the Electric Power Industry

O projecto Auction Agents for the Electric Power Industry (AAEPI) foi desenvolvido em conjunto pelo Reticular Systems, Inc. [Reticular, URL], criadores da plataforma AgentBuilder, e pelo Alternative Energy Systems Consultants [AESC, URL] para o Electric Power Research Institute [EPRI, URL].

A documentação que se encontra disponível data de 1999.

Introdução

O projecto centra-se no desenvolvimento de tecnologia multi-agente e sua aplicação ao mercado de energia. Este projecto mostra como vários agentes podem ser usados para comprar e vender energia e participar num mercado electrónico, em que podem actuar como compradores, vendedores, leiloeiros, licitantes ou representantes de produtores e consumidores de energia [AAEPI, URL].

Tipo de Mercado

O mercado consiste fundamentalmente num conjunto de agentes que representam os produtores e consumidores de energia eléctrica, que interagem para estabelecer contratos de compra e venda de energia, através de leilões de tipo Holandês, e de agentes Operadores da Rede de Transporte [Reticular Systems, 1999].

Os agentes que representam os vendedores e consumidores de energia têm a opção de conduzir um leilão e esperar por propostas; licitar em outros leilões ou conduzir um leilão e licitar em simultâneo. No entanto, para simplificar o processo de decisão dos agentes,

apenas foram implementados agentes que estão a conduzir um leilão ou apenas a licitar, sem conduzir nenhum leilão, não sendo permitida a alteração dinâmica dos papéis.

Um dos objectivos do estudo é determinar se é possível reduzir ou mesmo eliminar a presença de terceiras entidades, tais como Operadores de Mercado e Operadores de Sistema, sendo por isso abolida a presença de um leiloeiro central. Para compensar a falta de uma entidade central foi usado o Leilão Holandês, uma vez que é o menos vulnerável a abuso por parte do leiloeiro, e é colocada toda a informação sobre os leilões de forma aberta e pública num fórum acessível por todos.

Os agentes Operadores da Rede de Transporte são os responsáveis por monitorizar a capacidade dos seus recursos e manter actualizada a informação no fórum sobre a capacidade disponível. Assume-se que os custos de transporte são fixos e atribuídos com base na capacidade de transporte utilizada.

O mercado funciona continuamente sob um processo que tem três estados:

- **Leilão:** O estabelecimento de contratos entre vendedores e consumidores é feito por intermédio de um Leilão Holandês, que pode ser iniciado quer pelos compradores quer pelos vendedores. O processo inicia-se através da colocação de informação (relativa, por exemplo, à quantidade e período de tempo da energia a comprar ou vender, preço, identificação do “dono” da sessão, quantidade mínima aceite para contrato, ...) num fórum público, que pode ser um site na Internet ou, tal como foi definido para efeitos de demonstração, num ambiente de simulação, o *Energy Agent Simulation Environment*, que o permite fazer. De notar que num leilão de venda o preço estabelecido não inclui os custos de transporte (o local do comprador não é conhecido à priori), ao passo que num leilão de compra já é incluído. Sendo um Leilão de tipo Holandês, é sabido que o preço diminuirá nas sessões seguintes, no entanto o leiloeiro pode não avançar para a sessão seguinte, caso o preço vá descer para valores abaixo do seu preço limite (conhecido apenas pelo leiloeiro).
- **Definição de transacções:** A informação relativa ao preço e ao instante de início da entrega de energia é especificada ao definir-se o leilão, apenas a informação relativa à quantidade e duração da entrega tem de ser especificada de modo a definir completamente a transacção. Tal foi simplificado, fixando a duração das transacções em 1 hora e fixando o tempo de início a coincidir com o início da próxima hora do dia. Deste modo resta apenas definir a quantidade/capacidade a ser leiloadas.
- **Execução de transacções:** A execução de transacções é feita em dois passos. O primeiro passo requer que o leiloeiro verifique a possibilidade de execução da transacção. Se a execução é possível a transacção passa ao estado pendente,

aguardando aprovação final. O leiloeiro verifica todas as transacções e se surge alguma que não é viável a sua quantidade é reduzida de forma a eliminar possíveis sobrecargas, até que o mínimo da transacção por parte do licitante seja atingido ou o mínimo imposto pelo leiloeiro seja atingido. O segundo passo envolve a aprovação final do sistema, tendo em conta o responsável pela rede de transporte.

A informação a que os agentes têm acesso pode ser baseada em previsões, neste caso, por razões de simplicidade, as cargas e capacidades são dados de entrada da simulação e mantêm-se constantes. Por outro lado, os agentes têm acesso a informação relativa ao estado das sessões dos vários leilões, às transacções relevantes e ao estado da transmissão. Os agentes possuem a capacidade de armazenar informação histórica sobre as transacções.

Estrutura do Simulador

Foi criado um protótipo para demonstrar as ideias subjacentes ao projecto. No protótipo existem três tipos de agentes: Agentes de Compra/Venda, o Agente *Facilitador* e o Agente Controlo Experimental.

Os Agentes de Compra/Venda representam quer os produtores quer os consumidores de energia. Estes agentes podem ser vendedores ou compradores de energia, podem estar a conduzir um leilão (de compra ou venda), ou podem estar a participar num leilão como licitantes (para compra ou venda). Por razões de simplificação, o leilão é considerado para entregas de energia na próxima hora, ou seja, os agentes apenas têm um leilão a decorrer em cada instante, e existe sempre capacidade suficiente para satisfazer as necessidades de todos os licitantes.

O comportamento dos agentes é baseado num modelo composto por 3 componentes: estratégia de compra/venda, características de produção/procura do mercado, e requisitos de potência. Em termos de estratégia, cada agente tem uma única estratégia de compra/venda, podendo exibir um comportamento Compra ou Venda Ansiosa, Compra ou Venda “*Cool Headed*”, ou Compra/Venda Ambiciosa, sendo que a única diferença entre as estratégias é a forma como o preço varia ao longo do tempo, que será, aproximadamente, linear, exponencial ou em degrau [Reticular Systems, 1999].

Cada agente tem os seus requisitos de oferta/procura e as suas políticas para satisfazer os requisitos de oferta/procura. Estas políticas definem quanto é que cada agente está disposto a ganhar/gastar. Cada agente tem os seus requisitos de potência que variam ao longo do tempo. Enquanto o preço de mercado pode ditar até certo ponto o comportamento de compra/venda dos agentes, estes têm que se assegurar que as quantidades de potência necessárias são compradas/vendidas.

O Agente *Facilitador* é quem detem conhecimento sobre todos os Agentes de Compra/Venda que participam no mercado. Os Agentes de Compra/Venda comunicam

com o *Facilitador* as suas intenções de comprar ou vender energia, de querer ser licitante ou leiloeiro no mercado. O *Facilitador* actua como intermediário, relacionando agentes que pretendem comprar com os que pretendem vender e agentes que pretendem leiloar com os que pretendem licitar.

O Agente Controlo Experimental fornece uma interface gráfica que permite aos utilizadores controlar a sessão de simulação de um leilão e ver os resultados à medida que estes são obtidos. Este agente não compra nem vende energia, ele permite que um leilão seja simulado em vez de acontecer em tempo real, ao enviar os tempos da simulação aos compradores e vendedores e recolher os resultados do leilão.

Conclusões

Trata-se de uma aplicação bastante limitativa no que toca aos mecanismos de mercado simulados, uma vez que não permite a simulação de mercados em Bolsa nem o estabelecimento de Contratos Bilaterais que não através da execução de leilões de tipo Holandês, além de os agentes possuírem estratégias bastante simples para definição de preços. É, no entanto, mais um trabalho que vem atestar da enorme potencialidade que os sistemas multi-agente têm no contexto dos mercados eléctricos.

4.3.3 Simulator for Electric Power Industry Agents

O Simulator for the Electric Power Industry Agents (SEPIA) foi desenvolvido pelo Honeywell Technology Center [Honeywell, URL] e pela Universidade do Minnesota [Minnesota, URL], e financiado pelo Electric Power Research Institute [EPRI, URL].

Encontra-se alguma informação disponível em [SEPIA, URL], no entanto [Harp et al., 2000] fornecem uma visão mais pormenorizada do projecto.

Introdução

O SEPIA pretende ilustrar que a simulação baseada em agentes pode ser útil para analisar as implicações de determinados cenários, como congestionamentos na rede de transporte e situações de poder de mercado por parte de algumas entidades, entre outros.

O SEPIA permite fazer uma análise que nem é puramente económica nem é puramente eléctrica, mas sim um misto das duas.

Algumas das características do SEPIA são a definição de cenários através de um interface gráfico amigável e de fácil utilização; o facto de as entidades do sistema eléctrico serem representadas através de agentes, alguns dos quais podem usar algoritmos adaptativos para otimizar alguns dos seus atributos; e o facto de permitir que novos tipos de agentes possam ser acrescentados ao sistema, através da tecnologia COM da Microsoft.

Estrutura do Simulador

O SEPIA pode ser dividido em três componentes principais:

- interface gráfica, que permite aos utilizadores especificar, monitorizar e dirigir a simulação;
- agentes que representam as entidades específicas do domínio;
- mecanismo de simulação de eventos discretos que controla a evolução da simulação e a comunicação entre os agentes.

Os agentes SEPIA representam companhias produtoras, consumidores e o operador da rede de transporte. O sistema eléctrico é modelado como um conjunto de zonas interligadas, cada qual contendo os seus geradores e cargas, sendo, para efeitos de simplificação, ignorados os efeitos de transporte dentro de uma mesma zona da rede. Deste modo, as transacções entre produtores e cargas que pertencem a uma mesma zona têm automaticamente permissão para ocorrerem, ao passo que as que implicam transacções entre zonas diferentes têm que ser sujeitas a teste por parte do operador da rede de transporte. Tal permite modelar um sistema eléctrico como um conjunto simplificado de várias zonas. Também para efeitos de simplificação, as companhias produtoras e os consumidores só detêm geradores e cargas, respectivamente, pertencentes a uma mesma zona.

Os agentes consumidores são responsáveis por comprar a energia necessária às suas cargas, variáveis ao longo do dia, podendo comprar energia a companhias produtoras, pertencentes à mesma ou a outras zonas, através de Contratos Bilaterais. Os consumidores submetem pedidos a todas as companhias produtoras, que decidem a que pedidos responder e determinam o preço a cobrar, tendo ainda que se assegurar de que há capacidade de transporte para efectuar a transacção. Todas as transacções entre diferentes zonas têm que passar pela aprovação do operador da rede de transporte, que é responsável pela análise de segurança da rede e cálculo da capacidade de transporte disponível. Em cada zona existe um gerador de reserva, que vende energia a preço muito elevado, ao qual as companhias produtoras têm que recorrer, para abastecer consumidores dessa zona, caso se tenham comprometido a efectuar uma transacção que, por motivos de limite na capacidade de transporte, esteja inviabilizada.

Os agentes SEPIA são constituídos por várias camadas. Os agentes que representam as companhias produtoras possuem um módulo adaptativo, com componente de aprendizagem baseado no algoritmo Q-learning, que lhes permite explorar estratégias de definição de preço alternativas.

A figura 4.1 ilustra a estrutura dos agentes que representam as companhias produtoras.

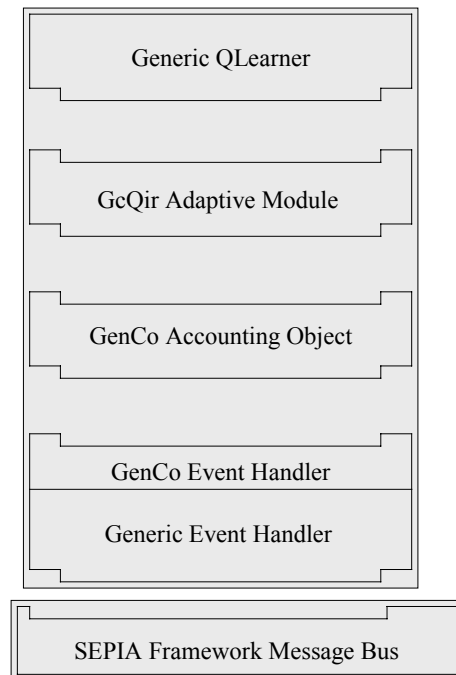


Figure 4.1: Estrutura dos Agentes, que representam Companhias Produtoras, no sistema SEPIA, em [Harp et al., 2000].

Conclusões

O SEPIA é um simulador que possui características bastante atraentes, nomeadamente a nível do interface gráfico de definição de cenários e análise da simulação. Por um lado é bastante abrangente, uma vez que mesmo a rede de transporte, tendo em conta a localização das cargas e produtores, bem como as restrições na capacidade de transporte, estão incluídas, embora de forma simplificada. Por outro lado, é limitado no que toca aos mecanismos de mercado que simula, uma vez que apenas permite a simulação de Contratos Bilaterais, mas exclui qualquer tipo de mercado em Bolsa.

Os agentes que representam as companhias produtoras são os únicos que possuem características relevantes, como a adaptatividade dos agentes. Relativamente aos agentes que representam os consumidores nada é dito acerca do seu processo de tomada de decisão. Trata-se no entanto de mais uma ferramenta que vem atestar as potencialidades da simulação baseada em agentes no domínio dos mercados competitivos de electricidade.

4.3.4 PowerWeb

Este projecto foi desenvolvido na Universidade de Cornell, com o objectivo de permitir simulações de mercados competitivos de electricidade [PowerWeb, URL].

A versão mais recente deste simulador data de Setembro de 2001.

Introdução

O PowerWeb é um ambiente de simulação interactivo, distribuído e baseado na Internet.

É possível utilizar o simulador através da Internet, com o *browser* Netscape, embora não seja possível verificar uma grande parte das características que são referidas na documentação disponível.

Tipo de Mercado

Este sistema assume a presença de uma entidade central, que actua como Operador Independente do Sistema (OIS).

Com base nas previsões de carga e ofertas de venda de energia, da parte de diferentes produtores, o OIS calcula a quantidade a produzir por cada um deles e o preço correspondente, de modo que a procura seja satisfeita e as restrições do sistema respeitadas. Caso a produção oferecida não seja suficiente para satisfazer a procura o OIS poderá comprar energia a preço de reserva em certos pontos da rede, onde se encontram os geradores de reserva.

Permite implementar mais do que um tipo de modelo de mercado, mas apenas mercados em Bolsa em que a procura se mantém fixa.

Inicialmente apenas mercados do tipo Mercado Assimétrico eram simulados, sendo o mecanismo baseado num leilão de preço uniforme, do tipo “última oferta aceite”, em que o preço pago pela energia eléctrica é determinado pela oferta mais cara que foi necessário aceitar, ou do tipo “primeira oferta rejeitada”, em que o preço a pagar pela energia é determinado pela oferta de venda mais barata de entre as que foram rejeitadas.

As últimas versões do PowerWeb referem já a possibilidade de serem simulados leilões discriminatórios e duplos. Embora não exista a possibilidade de o testar nem documentação com qualquer tipo de descrição, análise ou exemplo das suas características, da forma como podem ser utilizados ou de como foi de facto implementado, em [Mount et al., 2001] encontra-se um estudo comparativo entre leilões discriminatórios e uniformes baseado nesta plataforma.

É também referida a possibilidade de incluir perdas e congestionamentos do sistema de transporte. Para tal, as ofertas e os preços são ajustados tendo em conta uma taxa de transporte que depende da localização e que representa o custo de transportar a electricidade desde o local onde é gerada até ao local onde vai ser consumida. As unidades de produção são seleccionadas tendo em conta a satisfação da procura ao mais baixo preço possível e de forma a satisfazer as restrições do sistema de transporte. Para tal o OIS utiliza um programa de Despacho Óptimo que determina a afectação de cargas e taxas de transporte para cada gerador, sendo o processo de leilão efectuado sobre as ofertas já adicionadas da respectiva taxa de transporte.

Estrutura do Simulador

A simulação está organizada em sessões. Uma sessão consiste em informação especificando o tipo de sistema eléctrico, o mecanismo de mercado, o mapeamento de participantes em recursos do sistema (geradores), o número de períodos de negociação, entre outros. Cada vendedor é representado por um único gerador com capacidade máxima e mínima, e custo de operação definido por uma função que consiste em três segmentos, de acordo com a capacidade do gerador. É limitado no que toca ao número de geradores que é possível utilizar numa sessão, só podem ser 3 ou 6.

É possível entrar numa sessão como gerador, neste caso podem-se submeter ofertas de venda de energia e reavaliar o despacho e escalonamento de preços estabelecido pelo mercado, ou como administrador, o que permite visualizar os parâmetros e estado da sessão, informação sobre o sistema eléctrico, e resultados da sessão.

Cada sessão é estruturada em períodos de negociação. Cada período de negociação consiste em um ou mais períodos de despacho, durante os quais a procura e restantes condições se mantêm constantes. Por exemplo, um período de negociação de 24 horas pode consistir em 24 períodos de despacho, cada um de uma hora. Para cada período de negociação cada vendedor submete o preço de oferta da energia para cada um dos três blocos de capacidade disponível do seu gerador.

O PowerWeb inclui alguns agentes que automaticamente submetem ofertas relativas ao gerador a que estão associados, e que se podem utilizar nas simulações. Os agentes implementados são muito simples:

- **Custo Marginal:** são agentes que fazem as ofertas ao custo marginal para todos os blocos de capacidade;
- **Preço de Reserva:** submete ofertas de preço igual ao preço de reserva para qualquer dos blocos de capacidade;
- **Distribuição Normal do Custo Marginal:** as ofertas para cada bloco são escolhidas aleatoriamente através de uma distribuição normal do custo marginal;
- **Oferta Aleatória:** submete ofertas de preço aleatório entre zero e o preço de reserva;
- **Procura Insaciável:** o agente começa as ofertas com custo marginal para cada bloco, no primeiro período de negociação. Nos períodos seguintes aumenta ou diminui o preço da oferta por uma pequena quantidade, dependendo do facto de ter ou não lucro no período anterior. Enquanto o lucro aumentar ele continua na mesma direcção, caso contrário troca de direcção;
- **Sem Ofertas:** não submete ofertas para nenhum dos blocos de capacidade, sendo o seu objectivo o de modelar geradores fora de serviço.

Conclusões

Trata-se de uma ferramenta que apenas possibilita a simulação de alguns mercados organizados em Bolsa. A utilização de agentes é muito limitada, sendo os agentes muito simples e apenas utilizados para modelar diferentes ofertas de venda no mercado. Um outro aspecto também bastante limitativo é o facto de não ser possível alterar a procura ao longo de toda a simulação, além de o número de geradores que é possível simular ser de apenas 3 ou 6. O ambiente gráfico é bastante interactivo, embora grande parte das características referidas não possam ser utilizadas.

4.3.5 Electric Market Complex Adaptive Systems

O projecto Electric Market Complex Adaptive Systems (EMCAS) foi desenvolvido no Argonne National Laboratory, laboratório pertencente ao Departamento de Energia dos Estados Unidos, mais concretamente pela sua unidade de “Ciências da Informação e Decisão” [Argonne-DIS, URL].

A informação sobre este sistema só foi disponibilizada em data posterior a 22 de Agosto de 2002.

Introdução

Os autores deste sistema começaram por apresentar um simulador do mercado eléctrico - *Spot Market Agent Research Tool* (SMART) - que evoluiu e deu origem ao EMCAS. O SMART incluía o mercado de gás, sendo que a relação entre o mercado eléctrico e o mercado do gás era feita através de companhias geradoras que possuíam geradores alimentados a gás. No EMCAS já não é referido o mercado do gás.

O EMCAS possui agentes com capacidade de aprendizagem, baseada em algoritmos genéticos, que representam geradores, intermediários, consumidores e operadores independentes do sistema. Os mecanismos de negociação incluídos vão desde Contratos Bilaterais até Bolsas (dois tipos de leilão duplo: uniforme e discriminatório) e mercado de serviços de sistema.

Estrutura do Simulador

O simulador tem uma estrutura em que a gama temporal vai de horas até décadas, organizada em 6 escalas temporais ou níveis de decisão, que incluem despacho horário bem como planeamento a vários anos.

Existem vários tipos de agentes: Entidades Produtoras, Entidades de Transporte, Entidades de Distribuição, Operadores Independentes do Sistema ou Organizações Regionais de Transporte, Consumidores e Reguladores. Em cada nível de decisão os agentes gerem e formulam as suas estratégias de mercado.

Os Contratos Bilaterais são iniciados pelo agente que representa a procura, através da formulação de um *Request for Proposal* com base nas necessidades dos consumidores que

representa e na tolerância ao risco para exposição à volatilidade dos preços da Bolsa. Os agentes que representam produtores analisam os pedidos e formulam respostas, que incluem um preço para a totalidade ou parte da energia pedida. A resposta dos agentes é baseada nos preços previstos para a Bolsa e Contratos Bilaterais, determinados através de análise da informação histórica do mercado e de previsões futuras. Os agentes que representam a procura analisam as respostas recebidas e aceitam as ofertas que maximizam a sua utilidade, determinada com base nas ofertas recebidas e preços previstos de mercado em Bolsa.

O mercado em Bolsa funciona com base num leilão duplo ou bi-lateral, que pode ser uniforme ou discriminatório. Cada agente submete licitações de forma independente, sem qualquer tipo de informação relativa às licitações dos outros agentes mas com base na informação pública sobre a Bolsa e resultados históricos.

O mercado de serviços de sistema inclui a regulação de frequência, que pode ser hierarquizada em três níveis de controlo da reserva de potência activa: primária, secundária e terciária.

O modelo de decisão dos agentes baseia-se na combinação de informação pública, disponibilizada a todos os participantes no mercado, e informação privada, que resulta no histórico de aceitação ou rejeição das suas licitações anteriores. Com base nessa informação os agentes revêm as suas estratégias de mercado para a próxima ronda. O número de rondas de negociação é controlado pelo utilizador.

O comportamento dos agentes é função da sua tolerância ao risco. A tolerância dos agentes ao risco é classificada em três níveis: “avesso ao risco”, “indiferente ao risco” e “favorável ao risco”, e é modelada usando uma função de utilidade multi-objectivo de Von Neumann-Morgenstern. Por exemplo, um agente avesso ao risco pode desprezar potenciais lucros em Bolsa e optar por Contratos Bilaterais garantidos.

Os agentes descritos com mais pormenor são os que representam as Entidades detentoras de unidades de produção. Relativamente a este tipo de agentes é dito que incluem vários blocos, que representam diferentes tarefas ou acções do agente. Cada agente irá organizar e parametrizar estes vários blocos de modo a maximizar a sua utilidade. Um bloco consiste em uma ou mais regras relativamente simples, por exemplo “se o agente é que definiu o preço de mercado então irá propor no próximo período um preço ligeiramente superior”, existindo neste caso, um parâmetro que especificará qual a percentagem de modificação do preço. Os blocos podem ser combinados para definir novas estratégias.

O Agente Operador Independente de Sistema (OIS) é responsável por operar a rede de transporte mantendo a segurança e fiabilidade. Este agente faz projecções para o dia seguinte: tempo, procura e capacidade disponível, que são disponibilizadas a todos os

agentes do mercado, através de um boletim público. É este agente que opera a Bolsa, de acordo com as regras definidas pelo utilizador, e o mercado de serviços de sistema.

O simulador contém um módulo que simula os fluxos de transporte na rede operada pelo OIS, através de um modelo AC/DC, e permite reduzir a rede de transporte original a uma equivalente constituída por várias zonas, dentro das quais assume não haver congestionamentos, simplificando assim o processo.

Conclusões

Trata-se de um simulador bastante abrangente, que permite simular mercados em Bolsa e Contratos Bilaterais, possui agentes que representam vários tipos de entidades dos mercados eléctricos e que aprendem ao longo das várias rondas de negociação.

É, sem dúvida, a ferramenta mais completa que encontramos, embora seja também a mais recente, ou, a mais recentemente tornada pública através da Internet, uma vez que a informação que disponibiliza em [Argonne-DIS, URL] é posterior a Agosto de 2002, altura em que sobre o nosso simulador já tinham sido feitas várias publicações. Podemos dizer que o EMCAS evoluiu num sentido bastante idêntico ao do nosso simulador no que diz respeito à simulação de vários tipos de mercado e na representação das várias entidades, tendo, contudo, os agentes de ambos os sistemas estratégias e comportamentos bastante diferentes. De facto, podemos dizer que o nosso sistema e o EMCAS desenvolveram-se em paralelo e provavelmente sem conhecimento mútuo, explorando alguns caminhos similares. Contudo, não deixa de ser gratificante verificar que algumas ideias propostas originalmente no nosso simulador também foram seguidas por uma entidade tão importante, ligada ao Departamento de Energia dos Estados Unidos da América.

4.3.6 Outros Trabalhos

Nesta secção pretendemos destacar alguns trabalhos na área do estudo dos mercados eléctricos que são bastante relevantes, embora apresentem um carácter mais restrito ao estudo de um mercado particular, ou modelo de mercado.

O Professor Derek Bunn e o seu grupo do Energy Markets Group [EMG, URL], da London Business School, tem vindo a desenvolver estudos de simulação sobre o mercado eléctrico de Inglaterra e País de Gales e as transformações por que tem passado. Inicialmente, foi feito um estudo de simulação baseada em agentes, para analisar a introdução de Contratos Bilaterais e foram analisados mecanismos de estabelecimento de preço uniforme versus discriminatório [Bunn e Bower, 2000]. Neste estudo, os agentes representavam apenas produtores de electricidade, sendo o consumo representado por uma curva agregada de procura. Os agentes possuíam um comportamento adaptativo muito simples. O modelo de simulação foi usado para analisar a introdução de Contratos

Bilaterais tendo em conta os produtores de electricidade presentes no mercado no ano de 1998.

Posteriormente o modelo de simulação foi alargado [Bunn e Oliveira, 2001], passando a incluir agentes que representam a procura e o Operador de Sistema, embora o sistema de transporte não seja incluído no modelo, com o objectivo de estudar o comportamento das transacções bilaterais e mercado de ajustes. Os agentes passam a ter capacidade de aprendizagem, com base num mecanismo de aprendizagem por reforço. O modelo de simulação foi usado para estudar o mercado tal como existia no Verão de 2000, com 24 entidades produtoras de electricidade que vendiam a 13 entidades que representavam a procura. Foi também usado para analisar a separação de capacidade produtiva no sentido de evitar manipulação dos preços da Bolsa [Bunn e Day, 2001]. Posteriormente [Bunn e Oliveira, 2003], o modelo foi também usado para analisar até que ponto duas companhias produtoras de electricidade, British Energy e a AES, detinham capacidade para exercer poder de mercado, em consequência destas se terem recusado a assinar uma cláusula relativa a abuso de poder, proposta pela entidade reguladora britânica, a OFGEM [OFGEM, URL]. Este estudo, apesar de limitado no que toca ao modelo de simulação, uma vez que apenas reflecte as regras do mercado de Inglaterra e País de Gales, vem atestar das mais valias que ferramentas deste género trazem às entidades de mercado, no sentido de avaliarem o desempenho presente e esperado das regras de mercado, de modo a que os ajustes necessários possam ser efectuados o mais antecipadamente possível.

Também na Universidade de Iowa, Nicolaisen, Petrov e Tesfatsion [Nicolaisen et al., 2001] desenvolveram um estudo de simulação para analisar o mercado eléctrico, funcionando com base num mecanismo de venda em leilão duplo discriminatório, com agentes vendedores e compradores (que representam retalhistas e não consumidores) que actualizam as suas ofertas com base em experiências anteriores. Os agentes aprendem com base num algoritmo de aprendizagem por reforço. O estudo foi desenvolvido no sentido de avaliar o poder de mercado de compradores e vendedores relativamente a diferentes concentrações (nº de compradores versus nº de vendedores) e capacidades (total da procura versus total de produção), analisando de que modo o poder de mercado é afectado pela estrutura de mercado ou pela aprendizagem dos vendedores e compradores. Trata-se de um trabalho extremamente interessante, mas que se destina apenas ao estudo dos mercados baseados em leilões duplos discriminatórios.

Em [Tesfatsion, URL] é possível encontrar informação sobre este trabalho e uma série de apontadores para alguns sítios de Internet com informação sobre mercados eléctricos.

Apesar de não se tratarem de simuladores baseados em agentes, também Javier Contreras [Contreras, URL] desenvolveu trabalho na área dos simuladores de mercados eléctricos. Em [Contreras et al., 2001] é proposto um simulador que representa um Mercado Simétrico com ofertas complexas, em que o utilizador actua como agente

licitante através de Java Applets, e em [Contreras et al., 2002] é relatada a experiência de utilização de um simulador de um mercado simétrico por um conjunto de alunos. Nestes trabalhos é realçada a relevância que este tipo de ferramentas significam, não só em termos de compreensão dos mecanismos de mercado mas também de adaptação dos próprios utilizadores a ambientes competitivos.

4.3.7 Comparação entre os Simuladores

Na tabela 4.1 apresentam-se de forma sucinta as características dos vários simuladores analisados, facilitando deste modo a sua análise comparativa.

O simulador mais completo é, sem dúvida o EMCAS. O SEPIA, embora limitado no que diz respeito ao modelo de mercado simulado, é também uma ferramenta muito interessante.

Tabela 4.1: Comparação entre os Simuladores apresentados.

	Agentes	Modelo de Mercado	Rede de Transporte	Procura	Comportamento Agentes
AMS	Compradores; Vendedores; Mediador	Leilão Duplo	Incluída mas Simplificada	Fixa	Adaptativos (Alg. Genéticos)
AAEPI	Compradores; Vendedores; Op. Rede Transporte	Leilão Holandês	Incluída mas Simplificada	Fixa	Estratégias de compra/venda dependentes do tempo
SEPIA	Produtores; Consumidores; Op. Rede Transporte	Contratos Bilaterais	Incluída mas Simplificada em Zonas	Variável	Aprendizagem Q-learning nos Agentes Produtores
PowerWeb	Vendedores; Op. Independente do Sistema	Bolsa (Assimétrica)	Incluída	Fixa	Comportamento simples para definir ofertas de venda
EMCAS	Produtores; Consumidores; Entidade de Transporte; Distribuidores; Op. Sistema; Reguladores	Contratos Bilaterais, Bolsa (Simétrica), Mercado de Serviços de Sistema	Incluída mas Simplificada em Zonas	----	Aprendizagem (Alg. Genéticos) e tolerância ao risco

4.4 Conclusões

São vários os desafios que se colocam às entidades dos mercados eléctricos, num contexto que é de transformações recentes e acentuadas. Como tal, revela-se de utilidade o uso de ferramentas que suportem a decisão dos intervenientes no mercado, permitindo-

lhês perceber e analisar o seu funcionamento, testando alternativas ainda antes de serem implementadas na prática.

O mercado de energia eléctrica pode ser visto como um problema de decisão multi-agente onde cada participante é um agente autónomo ou semi-autónomo. Tal como os agentes, as entidades dos mercados eléctricos possuem os seus próprios objectivos e uma certa autonomia. Os agentes podem actuar como compradores, vendedores, intermediários, comercializadores e operadores de sistema e de mercado. Os sistemas multi-agente, e em particular a simulação baseada em agentes revela-se uma forma adequada de desenvolver ferramentas que permitam, não só analisar o comportamento do mercado como um todo, mas também o comportamento individual das várias entidades e a forma como este pode influenciar ou ser influenciado pelo mesmo.

Assim, surgiram já alguns trabalhos que vêm de facto atestar a aplicabilidade dos agentes e sistemas multi-agente ao estudo dos mercados eléctricos. Alguns desses trabalhos foram apresentados, realçando-se as suas características principais e apontando as principais limitações que apresentam.

Nos próximos capítulos irá ser apresentado o simulador multi-agente desenvolvido, descrevendo-se os agentes, sua estrutura, características e comportamento.

Capítulo 5

MASCEM: Modelo Proposto

O MASCEM – Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets, Simulador Multi-Agente para Mercados Competitivos de Energia Eléctrica, pretende servir de ferramenta de apoio às entidades intervenientes nos Mercados Eléctricos que lidam com a necessidade de melhor compreender o comportamento, a evolução das relações comerciais e os mecanismos destes mercados.

No presente capítulo é apresentado o modelo multi-agente do simulador. Os vários agentes são descritos em termos de objectivos, conhecimento e características intrínsecas. São também descritos os protocolos de negociação entre os agentes.

Introdução

O mercado liberalizado de energia eléctrica implica mudanças ao nível do fluxo de energia eléctrica desde a sua produção até ao consumidor final, alterações na forma como é vendido o produto “energia eléctrica”, alterações na forma como é comprado, etc. Há que ter em consideração as duas perspectivas: a perspectiva física do Sistema Eléctrico de Energia, onde é necessário considerar todas as restrições da sua operação, em que questões tais como a gestão da potência reactiva/controlo da tensão, reservas, fiabilidade e estabilidade devem ser considerados em cada momento de forma a garantir que o fornecimento de energia seja assegurado dentro dos padrões previamente fixados; e o lado do negócio do mercado, em que a gestão do risco do vendedor e comprador e as suas opções devem ser analisadas. Numa fase inicial, o nosso simulador debruça-se essencialmente sobre o lado do negócio do mercado. No entanto, todo o modelo está preparado para funcionar tendo em consideração estas duas vertentes, tão interligadas e dependentes como na realidade estão.

Neste capítulo é feita a descrição do modelo, baseado em agentes, que irá servir de suporte ao desenvolvimento de uma ferramenta de simulação utilizável pelas várias entidades intervenientes nos Mercados de Energia Eléctrica para aumento do seu conhecimento sobre as novas regras de funcionamento do mercado e a forma de nele negociar, e para apoio à sua tomada de decisões.

Os principais intervenientes, tendo em conta a vertente de negócio dos mercados de energia eléctrica, são os vendedores e compradores de energia. Assim, os agentes que representam estas entidades são alvo de uma descrição pormenorizada, em termos da sua estrutura e das respectivas interacções.

A definição de um sistema multi-agente que permite a realização de negociações automáticas, como no caso do MASCEM, engloba a definição de duas componentes fundamentais: o protocolo de negociação entre os agentes e as estratégias de negociação. O protocolo de negociação define as regras que guiam a interacção entre os agentes. O MASCEM inclui vários tipos de negociação. Neste capítulo é feita a descrição do protocolo de negociação entre os agentes para cada um desses tipos. As estratégias de negociação determinam o comportamento dos agentes e serão descritas no capítulo 6.

5.1 Características

Um dos principais objectivos do nosso simulador é o de ser uma ferramenta útil para que as entidades intervenientes no mercado eléctrico possam compreender melhor os novos mecanismos de negócio e, assim, possam suportar melhor as suas decisões. Deste modo, uma das características fundamentais do MASCEM é o facto de permitir o estudo de vários mecanismos de negociação usualmente encontrados em mercados liberalizados de energia eléctrica, desde mecanismos de negociação em Bolsa à negociação por Contratos Bilaterais.

O simulador desenvolvido destina-se ao estudo do mercado *spot*, encontrando-se um dia dividido em 24 períodos de negociação consecutivos, que correspondem às 24 horas do dia.

A flexibilidade do simulador é também uma característica fundamental. O utilizador tem toda a liberdade na definição dos cenários a simular: indica o número e características dos compradores e fornecedores de energia eléctrica; selecciona os mecanismos de negociação a estudar e a duração do período de análise do mercado.

O utilizador poderá, depois de simulado o cenário que especificou, analisar qual o preço de mercado e quantidade de energia eléctrica transaccionada em cada período de negociação, e quais os resultados individuais dos agentes, particularmente dos que representam os compradores e fornecedores de energia eléctrica, ou seja, de que modo os objectivos de cada um foram atingidos e qual o preço conseguido.

O mesmo cenário poderá ser analisado diversas vezes por forma a que o utilizador possa retirar as conclusões pretendidas. Deste modo, pode, por exemplo, estudar exactamente o mesmo cenário com um outro mecanismo de negociação, comparando as várias formas de negociar neste tipo de mercados, ou, noutra perspectiva, alterar as características ou comportamento de uma, ou mais, entidades, quer sejam compradores quer sejam fornecedores, de modo a estudar o seu desempenho em particular.

Numa fase inicial, este simulador está mais vocacionado para o estudo das transacções comerciais, embora tudo esteja previsto para que se possa estender o modelo de forma a incluir algoritmos de gestão e análise de redes, entre outros.

5.2 Arquitectura do Simulador MASCEM

O MASCEM foi desenvolvido com o intuito de modelar as diferentes entidades dos mercados eléctricos e as interacções entre elas. Identificaram-se as principais entidades que são representadas num modelo multi-agente.

Assim, tal como ilustrado na figura 5.1, estão representados os fornecedores de energia eléctrica, os compradores, bem como as entidades que regulam o mercado e as redes eléctricas.

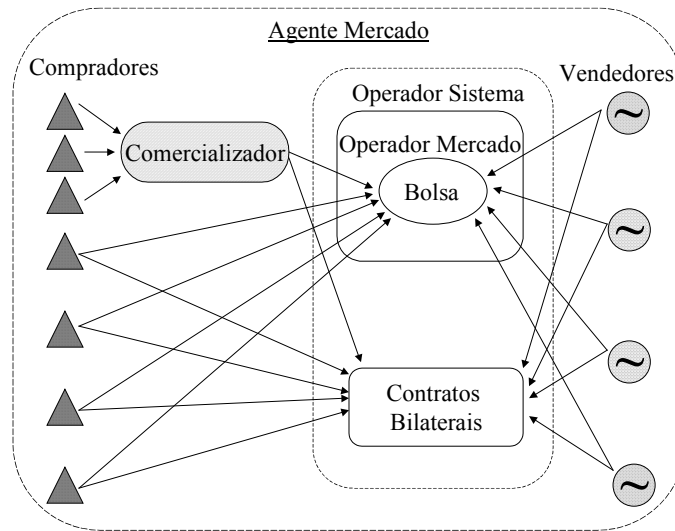


Figure 5.1: Modelo Multi-Agente do MASCEM.

5.2.1 Modelo Multi-Agente

Os participantes no mercado são representados no nosso sistema através de agentes autónomos e heterogêneos, com capacidades sensoriais de modo a perceberem o ambiente onde estão inseridos e actuarem em conformidade com ele e com os seus próprios objectivos.

5.2.1.1 Agentes

Agente Mercado

É o coordenador do mercado. É o agente que detém a identificação de todos os agentes que se encontram no sistema, pois estes, caso pretendam entrar no mercado, têm que começar por se registar, identificando qual o seu papel e competências. Sem efectuar o registo um agente não tem possibilidade de conhecer outros agentes do sistema, ficando impossibilitado de estabelecer qualquer tipo de interacção. Sempre que um agente entra ou sai do mercado, o Agente Mercado regista essa informação.

É através deste agente que agentes com interesses complementares são postos em contacto. É também o Agente Mercado que regula todos os processos de negociação entre os agentes e se assegura que o mercado funciona de acordo com as regras estabelecidas.

Agente Vendedor

É uma das entidades fundamentais do mercado. Representa as entidades que possuem a capacidade de vender energia eléctrica, como sejam as empresas que detêm unidades de produção de energia eléctrica.

Agente Comprador

É outra das entidades fundamentais, representando as entidades que compram energia eléctrica no mercado, e que podem ir desde distribuidores a consumidores finais.

Agente Operador de Sistema

É o responsável pela gestão do Sistema Eléctrico, sobre o qual todas as transacções de mercado se efectuam.

É através deste agente que é feita a ligação entre as transacções comerciais e o sistema eléctrico físico sobre o qual estas vão acontecer. Embora este trabalho não cubra aspectos relacionados com o trânsito de potências e restrições técnicas na rede eléctrica, permite, através deste agente, a inclusão futura de algoritmos de análise de trânsito de potências que analisam a viabilidade técnica de todas as transacções comerciais que se pretendam efectuar. Os serviços fornecidos pelo agente estão já definidos, bem como a interacção com os restantes agentes, sendo apenas necessário que os procedimentos associados a esses serviços passem a incluir algoritmos de análise de rede adequados.

Antes que qualquer tipo de contrato ou transacção seja aprovado é necessário solicitar ao Agente Operador de Sistema a análise da sua viabilidade técnica (quer estejamos perante Contratos Bilaterais ou negócios estabelecidos por intermédio da Bolsa).

Agente Operador de Mercado

É o responsável pelo funcionamento do mercado em Bolsa, estando apenas presente em caso de simulações de mercados em Bolsa ou Mistos.

É este agente quem regula o funcionamento da Bolsa, recebe as propostas apresentadas pelos Agentes Vendedores e/ou Compradores, analisa essas propostas, aplicando o mecanismo de mercado seleccionado e, com auxílio do Agente Operador de Sistema, define quais as transacções a efectuar, indicando aos agentes que participaram no mercado se as suas propostas foram ou não aceites e qual o preço que foi estabelecido na Bolsa.

Agente Comercializador

Representa as entidades com autorização para comprar e vender energia eléctrica, mas que não detêm capacidade produtiva. Um dos objectivos do Comercializador será conseguir a maior carteira possível de clientes, ou seja, Agentes Compradores. Outro objectivo, será obter o maior lucro possível nas negociações com os Agentes Vendedores, tendo em conta os acordos estabelecidos com os seus clientes.

Tal como já foi referido, o MASCEM destina-se sobretudo ao estudo das relações comerciais no âmbito dos mercados competitivos de energia eléctrica, como tal os agentes que assumem o papel mais relevante, porque são os que estão directamente envolvidos nessas transacções, são os Agentes Vendedores e os Agentes Compradores. Assim, dá-se particular destaque a este tipo de agentes. Do mesmo modo, e tal como o nome indica, o Agente Comercializador assume também um papel de bastante relevo no que toca às transacções comerciais, sendo também alvo de uma descrição mais pormenorizada.

5.2.1.2 Descrição formal

O mercado de energia é representado pela estrutura:

$M = \{\text{Agt}, \text{Papel}, \text{Ont}, \text{Msg}\}$, em que

- **Agt** é o conjunto de identificadores dos agentes presentes no mercado;
- **Papel** = {Comprador, Vendedor, Operador de Sistema, Operador de Mercado, Comercializador} indica qual a função que um agente desempenha no mercado;
- **Ont** é a ontologia adoptada na descrição dos bens do mercado;
- **Msg** é o conjunto de mensagens que os agentes presentes no mercado podem trocar entre si. Estas mensagens obedecem à especificação da linguagem ICL, tendo em conta a plataforma de desenvolvimento OAA. Na secção 5.2.4 é feita a descrição da interacção entre os agentes, apresentando-se para cada caso as mensagens trocadas entre os agentes.

5.2.1.3 Ontologia dos bens do mercado

A ontologia dos bens de mercado identifica e representa os bens que constituem o objecto de transacção nesse mercado. Embora neste momento o MASCEM considere a energia eléctrica como o único bem em transacção, a ontologia foi definida de modo a permitir considerar um mercado de energia mais abrangente, em que vários tipos de energia possam ser transaccionados, desde energia eléctrica ao gás, por exemplo.

Para caracterizar o bem em transacção, ou seja, o tipo de energia em transacção no mercado, é necessário caracterizar os seus pontos de produção e de consumo. Os atributos que fazem parte da caracterização do bem “energia eléctrica” dizem respeito às características dos seus geradores, como o tipo, e características inerentes ao tipo de central produtora, localização na rede, entre outros, e às características das suas cargas, como o tipo, localização, etc. Os conceitos a representar são, no fundo, as necessidades dos consumidores e as capacidades produtivas dos vendedores.

A ontologia está estruturada com base na definição do “Bem” em transacção, “Bem” esse que é identificado por um conjunto de Geradores e Cargas, que por sua vez são

caracterizados por um conjunto de atributos, identificados pelo tipo de valores que assume e pelo domínio de valores possíveis de ocorrer.

Como exemplo apresenta-se na figura 5.2 uma pequena parte da definição do bem “energia eléctrica”.

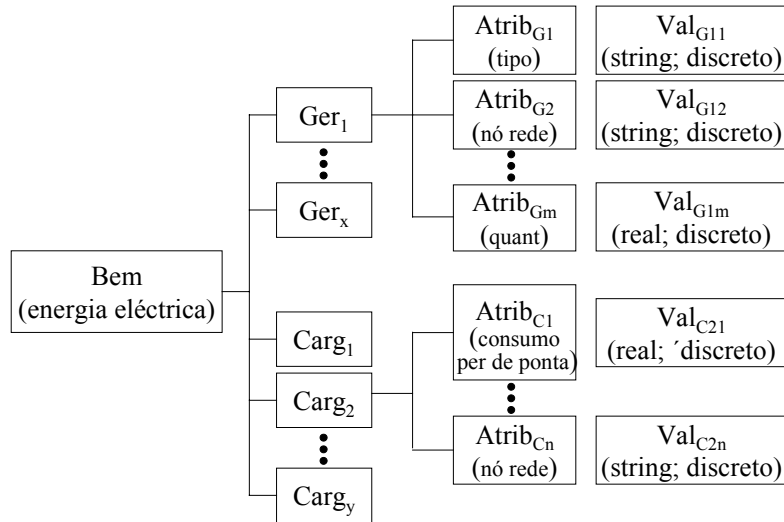


Figure 5.2: Descrição parcial do bem “Energia Eléctrica”.

A ontologia é representada pela estrutura:

Ont = {Bem, Ger, Carg, Atrib, Val, GA_r, CA_r, AV_r}, em que:

- **Bem** é o tipo de energia em transacção;
- **Ger** é o conjunto de geradores do bem;
- **Carg** é o conjunto das cargas;
- **Atrib** é o conjunto de identificadores de atributos;
- **Val** é o conjunto de identificadores de valores de um atributo. Cada valor é representado por:

$$\rightarrow Val_i = \{Tipo, Dom\}$$

$$\rightarrow Tipo = \{inteiro, real, string\}$$

$$\rightarrow Dom = \{discreto, contínuo\}$$

- Relação **GA_r** afecta cada gerador a um conjunto de atributos e é representada por:

$$\rightarrow GA_r : Ger_i \rightarrow \{Atrib\}, \forall Ger_i \in Ger;$$

- Relação **CA_r** afecta cada carga a um conjunto de atributos e é representada por:

$$\rightarrow CA_r : Carg_i \rightarrow \{Atrib\}, \forall Carg_i \in Carg;$$

- Relação **Av_r** afecta a cada atributo um valor e é representada por:

$$\rightarrow AV_r : Atrib_i \rightarrow Val_k, \forall Atrib_i \in Atrib, \exists^1 Val_k \in Val.$$

5.2.2 Agente Vendedor e Comprador

Embora possuam objectivos completamente diferentes, e de certa forma antagónicos, já que o objectivo dos Agentes Vendedores é o de vender toda a sua capacidade produtiva ao preço mais elevado possível, ao passo que o dos Agentes Compradores é o de adquirir a energia necessária ao mais baixo custo possível, a estrutura destes dois tipos de agente é muito semelhante, pelo que são tratados na mesma secção, realçando-se sempre que necessário as diferenças que apresentam.

5.2.2.1 Estrutura

A estrutura dos Agentes Vendedores e Compradores está organizada em três módulos funcionais: o Módulo de Gestão de Eventos, o Módulo de Gestão da Negociação, o Módulo de Tomada de Decisão e um módulo de conhecimento, o Módulo de Conhecimento Individual e de Mercado, tal como é ilustrado na figura 5.3.

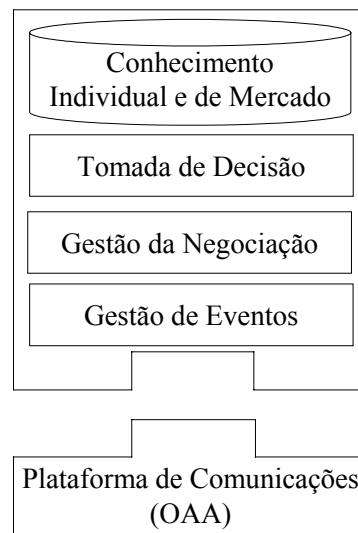


Figure 5.3: Estrutura dos Agentes Vendedores e Compradores.

Módulo de Gestão de Eventos

Este módulo trata da gestão dos processos relacionados com as trocas de mensagens entre os agentes, fazendo o interface com a plataforma OAA.

É através deste módulo que é feita a recepção de mensagens, a sua descodificação e análise do conteúdo, de modo a que seja convenientemente processada.

Do mesmo modo, qualquer mensagem que o agente pretenda enviar, quer se destine a responder a pedidos recebidos por parte de outros agentes, quer se destine a requisitar o serviço de outros agentes, por iniciativa própria ou como passo necessário à resposta a um pedido recebido, é codificada e enviada ao(s) agente(s) a quem se destina(m) através deste módulo.

Um dos componentes mais importantes deste módulo é o procedimento OAA `oaaDoEventCallback`, que analisa os pedidos recebidos pelo agente, os descodifica e encaminha para os procedimentos respectivos. Podem encontrar-se mais detalhes sobre esta questão na secção 3.2.4, onde é feita a descrição da OAA.

Módulo de Gestão da Negociação

É através deste módulo que é feita a gestão do comportamento do agente e sua coordenação com os demais agentes durante o processo de negociação.

Durante o processo de negociação são várias as propostas e contra-propostas trocadas entre os agentes intervenientes. Os agentes intervenientes vão desde os Agentes Vendedores e Compradores, principais entidades do processo de compra e venda de energia, aos agentes que regulam a rede de transporte e distribuição, passando ainda pelos agentes intermediários em algumas transacções comerciais, nomeadamente nas que se efectuam através da Bolsa.

No estabelecimento de Contratos Bilaterais, Agentes Compradores e Vendedores trocam várias propostas e contra-propostas no sentido de estabelecerem um contrato que satisfaça ambos. Por parte do agente que toma a iniciativa, o primeiro passo é a formulação de um pedido enviado, por intermédio do Agente Mercado, a todos os agentes capazes de o satisfazer. As resposta recebidas são então analisadas e o agente aceita uma das propostas, formula uma contra-proposta a enviar a todos, ou apenas a alguns dos agentes que lhe responderam, ou rejeita de imediato as propostas recebidas, tentando, por exemplo, satisfazer as suas necessidades noutra tipo de mercado, como a Bolsa.

Nos mercados que funcionam sob a forma de uma Bolsa, os Agentes Vendedores e Compradores que entendam participar na Bolsa, formularão as propostas a enviar e, mediante o resultado da Bolsa, formularão ou não propostas para tentativa de estabelecimento de Contratos Bilaterais, no caso de se tratar de um mercado Misto.

Este módulo é o responsável pela formulação de todas as propostas e contra-propostas inerentes aos vários tipos de negociação em que os agentes possam estar envolvidos. Este módulo funciona de forma interligada com o Módulo de Tomada de Decisão, que é o responsável pela análise dos resultados dos períodos anteriores e definição dos objectivos e comportamento a exhibir em cada novo período de negociação.

Na secção 5.2.4, será feita uma análise detalhada dos vários tipos de negociação, analisando-se para cada caso o processo de formulação de propostas e contra-propostas e as mensagens trocadas entre os agentes.

Módulo de Tomada de Decisão

O Módulo de Tomada de Decisão é o responsável pela análise dos resultados e conhecimento adquirido ao longo dos períodos de negociação anteriores, estabelecimento dos objectivos e definição do comportamento estratégico do agente para cada novo período de negociação.

Do comportamento estratégico dos agentes fazem parte:

- estratégias para variação do preço ao longo de um período de negociação;
- estratégias de definição do preço inicial das propostas a efectuar num período, com base no conhecimento e nos resultados obtidos nos períodos de negociação anteriores;
- estratégia de análise do comportamento, possível e estimado, dos outros agentes participantes no mercado.

Todas estas estratégias serão abordadas com detalhe no capítulo 6.

Módulo de Conhecimento Individual e de Mercado

Este módulo engloba, por um lado, a informação relativa ao próprio agente, quais as suas capacidades e/ou necessidades, e, por outro lado, a informação relativa ao conhecimento do mercado. O conhecimento do mercado compreende desde os compromissos assumidos pelo agente ao conhecimento que vai acumulando sobre a evolução do comportamento do mercado e sobre o comportamento dos outros agentes presentes. Este módulo vai sendo actualizado ao longo do tempo.

Dada a sua natureza, o tipo de informação que faz parte deste módulo é substancialmente diferente para Agentes Vendedores e Compradores, pelo que se apresentam as estruturas que reflectem a informação relativa a cada um.

A estrutura que representa, no caso dos Agentes Vendedores, a sua capacidade de produção de energia, descreve os geradores que lhe pertencem.

$\text{Gerador}_j = \{ \text{Ger}_j, \text{Atribs}_j, \text{Val_Atribs}_j \}$, em que:

- **Ger_j** é o identificador do gerador j ;
- **Atrib_j** é o conjunto dos atributos relacionados com o Gerador_j ;
- **Val_Atribs_j** é o conjunto de valores que o agente consegue atribuir aos diferentes atributos.

A informação relativa a alguns atributos, como sejam, por exemplo, os valores produzidos por gerador, pode variar ao longo do tempo, nomeadamente devido a

condições climatéricas, para alguns tipos de produção de energia eléctrica, sendo por isso actualizada sempre que necessário.

No caso dos Agentes Compradores, a estrutura que descreve as suas necessidades de consumo de energia, descreve as cargas que a ele estão associadas e é representada da seguinte forma:

$Carga_i = \{ Carg_i, Atribs_i, Val_Atribs_i \}$, em que:

- **Carg_i** é o identificador da carga *i*;
- **Atrib_i** é o conjunto dos atributos relacionados com a Carga_i;
- **Val_Atribs_i** é o conjunto de valores que o agente consegue atribuir aos diferentes atributos.

Relativamente às cargas, alguns dos atributos que as caracterizam são os valores de consumo em horas de vazio, cheia e ponta.

Do conhecimento individual do agente faz também parte a informação relativa aos compromissos, de fornecimento de energia no caso de Agentes Vendedores e de compra de energia no caso dos Agentes Compradores, por ele assumidos. A estrutura dessa informação é a seguinte:

$Compr_i = \{ Ger_i, Quant_i, Sat_i \}$, em que:

- **Ger_i** é o identificador do gerador;
- **Quant_i** é um parâmetro que indica a utilização desse gerador na satisfação do compromisso *i*;
- **Sat_i** é um parâmetro que indica se o compromisso foi ou não cumprido. Este parâmetro foi incluído para futuras análises, nomeadamente de qualidade de serviço, ao se estender o modelo a uma negociação multi-critério, em que a qualidade de serviço seja um dos factores a analisar na avaliação de propostas.

No caso do consumo de energia, a informação irá dizer respeito à satisfação ou não das necessidades de consumo do agente, estando essa satisfação associada ao estabelecimento de um grau de confiança entre Agente Comprador e Vendedor, para o caso de negociações por Contratos Bilaterais.

$Compr_i = \{ Carg_i, Agt_i, Sat_i \}$, em que:

- **Carg_i** é o identificador da carga;
- **Agt_i** é a identificação do agente, sempre que conhecida, que se comprometeu a alimentar essa carga;
- **Sat_i** é um parâmetro que indica se o compromisso foi ou não cumprido. Este parâmetro foi incluído para análise do grau de confiança que um Agente

Vendedor merece. Também este parâmetro será particularmente útil na extensão do modelo a negociações multi-critério, em que um dos critérios de avaliação das propostas seja o grau de confiança no parceiro de negociação.

Importante para a evolução e determinação do comportamento estratégico do agente é o histórico das negociações efectuadas, quer relativamente às propostas efectuadas pelo agente quer às propostas recebidas. De notar que as propostas elaboradas pelo próprio agente podem ser propostas a efectuar à Bolsa ou surgir no âmbito de negociações com vista à realização de Contratos Bilaterais.

A informação sobre o comportamento dos outros agentes presentes no mercado vai sendo construída com base nas propostas e contra-propostas trocadas, sendo o preço uma informação crucial na caracterização desse comportamento.

A estrutura representativa da informação relativa ao histórico de negociações é:

$H_a = \{ \text{Prop_bolsa}_{ap}, \text{Prop}_{ap}, \text{Prop_rec}_{ajp} \}$, em que:

- **Prop_bolsa_{ap}** = { Atribs_i, Act_i } é o conjunto das propostas feitas pelo agente a à Bolsa no período de negociação p ;
- **Prop_{ap}** = { Atribs_i, Act_i } é o conjunto das propostas feitas, no âmbito de negociações bilaterais, pelo agente a no período de negociação p ;
- **Prop_rec_{ajp}** = { Atribs_i, Act_i } é o conjunto das propostas que o agente a recebeu do agente j no período de negociação p ;

sendo Atribs_i o conjunto dos atributos da proposta, entre os quais o preço e a quantidade a transaccionar, e Act_i o indicador de aceitação ou não dessa proposta.

Relativamente ao comportamento do mercado, quando se trata de mercados em Bolsa ou Mistos, os agentes registam o preço de mercado e a energia transaccionada ao longo dos vários períodos de negociação. Tal informação servirá de suporte a algumas das estratégias de definição de preço e permitirá fazer análises e estimativas acerca da evolução do mercado. A estrutura da informação relativa ao comportamento do mercado será, nesses casos:

Info = { Pr_p, Quant_p }, em que:

- **Pr_p** é o preço de mercado no período p ;
- **Quant_p** é a quantidade de energia transaccionada na Bolsa no período p .

De notar que a informação armazenada pelos agentes tem por base a utilização de *solvable*s de dados da plataforma OAA, ver secção 3.2.4.

A informação contida neste módulo é importante, sobretudo como suporte à definição do comportamento estratégico dos agentes, descrita no capítulo 6.

5.2.3 Agente Comercializador

O Agente Comercializador possui uma estrutura semelhante à dos Agentes Vendedores e Compradores no que diz respeito aos módulos de Gestão de Eventos, Gestão da Negociação, Tomada de Decisão e Conhecimento Individual e de Mercado.

A esta estrutura comum acresce um módulo de Gestão de Clientes, específico deste tipo de agente, e que inclui todas as funções relativas à angariação de clientes, ao processo de negociação de condições de contrato, e à renegociação de contratos.

Também o seu modelo de Tomada de Decisão é ligeiramente diferente, pois este agente é obrigado a fornecer aos seus clientes a energia com eles acordada, pelo que, ainda que por vezes algum contrato possa não satisfazer os seus requisitos em termos de lucro, poderá por esse motivo ter necessidade de o aceitar.

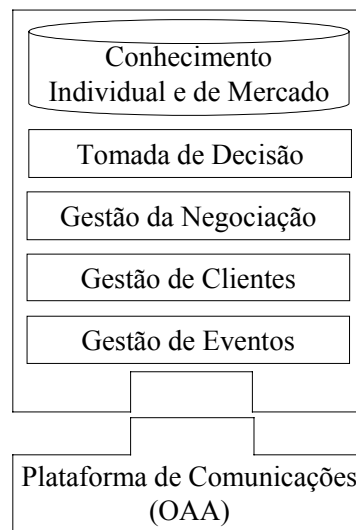


Figure 5.4: Estrutura do Agente Comercializador.

Relativamente às negociações em Bolsa e em Contratos Bilaterais, o Agente Comercializador segue os protocolos que iremos definir na próxima secção, secção 5.2.4, actuando à semelhança de um Agente Comprador, tendo em conta as diferenças acima realçadas.

Módulo Gestão de Clientes

Deste módulo fazem parte todas as funcionalidades associadas às interações com os Agentes Compradores, de modo a que estes se deixem representar pelo Agente Comercializador.

Essa interação pode dividir-se em duas fases fundamentais:

- uma fase inicial de abordagem ao estabelecimento de um contrato de fornecimento;
- uma fase posterior de renegociação das condições de contrato, findo o período para o qual este estava em vigor.

A figura 5.5 ilustra as mensagens trocadas nestas duas fases, entre o Agente Comercializador e os Agentes Compradores. De notar que, como já foi referido, o Módulo de Gestão da Negociação é semelhante ao dos Agentes Vendedores e Compradores, pelo que, a troca de mensagens é também semelhante e será descrita na secção 5.2.4.

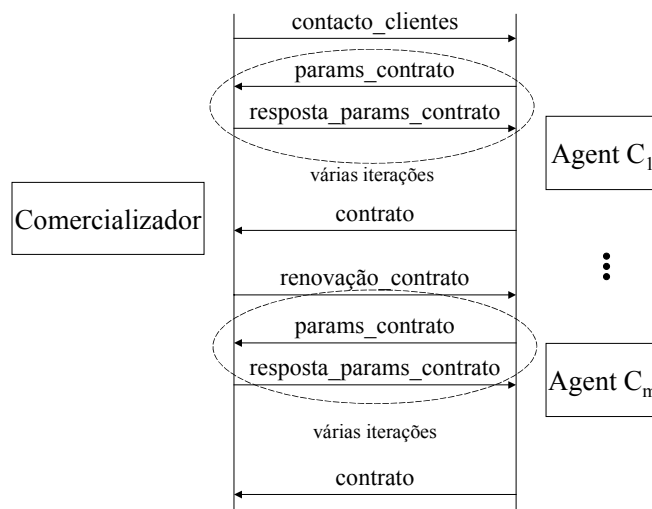


Figure 5.5: Interação entre Agente Comercializador e seus possíveis Clientes.

contacto_clientes(IdAgente, IdProp, Params, Coment)

- *IdAgente* identifica o Agente Comercializador;
- *IdProp* identifica a proposta de contrato;
- *Params* indica os parâmetros propostos para o contrato, como o preço, e os parâmetros que o Agente Comprador deverá especificar, como as suas necessidades de consumo e a duração que pretende para o contrato;
- *Coment* este campo destina-se a que o Agente Comercializador possa exercer uma certa argumentação perante o Agente Comprador com vista à aceitação do contrato. Poderá indicar, por exemplo, a sua “quota” de mercado, em termos das necessidades de consumo que já representa e que poderão servir de mais valia perante os negócios a efectuar com os Vendedores.

params_contrato(IdAgente, IdProp, Params)

- *IdAgente* identifica o Agente Comprador;
- *IdProp* identifica a proposta de contrato;
- *Params* indica os valores pretendidos pelo Agente Comprador para parâmetros do contrato, podendo alterar parâmetros já propostos pelo Comercializador, como o preço, caso este não lhe seja à partida favorável.

resposta_params_contrato(IdAgente, IdProp, Params)

- *IdAgente* identifica o Agente Comercializador;
- *IdProp* identifica a proposta de contrato;
- *Params* indica os novos valores propostos para o contrato, após análise das condições exigidas pelo Agente Comprador. Esses valores serão idênticos aos propostos pelo Comprador no caso de o Comercializador os aceitar.

contrato(IdAgente, IdProp, Params)

- *IdAgente* identifica o Agente Comprador;
- *IdProp* identifica a proposta de contrato;
- *Params* indica os valores acordados para o contrato.

Uma vez findo o prazo para o qual o contrato estava em vigor, o Agente Comercializador toma a iniciativa de contactar o Agente Comprador no sentido de renovar o contrato, propondo os mesmos valores já acordados para os parâmetros, ou outros que lhe possam ser mais vantajosos.

renovação_contrato(IdAgente, IdProp, Params, Coment)

- *IdAgente* identifica o Agente Comercializador;
- *IdProp* identifica a proposta de contrato;
- *Params* indica os novos parâmetros propostos para o contrato, que podem ser idênticos aos já acordados;
- *Coment* pode ser usado para indicar resultados conseguidos ou aumento da carteira de clientes, tentando exercer uma certa influência no sentido da renovação do contrato.

A partir do contacto inicial para a renovação do contrato, as mensagens trocadas entre os agentes são similares às trocadas aquando do estabelecimento do contrato inicial.

5.2.4 Interação entre os Agentes

Os mecanismos de mercado que o MASCEM implementa são o Modelo em Bolsa, o Modelo de Contratos Bilaterais e o Modelo Misto, já descritos na secção 2.1.3.3. Nesta secção vamos abordar o processo de interação entre os agentes para cada um destes tipos de negociação, descrevendo, para cada caso, as mensagens trocadas entre os agentes.

De notar que as mensagens trocadas pelos agentes têm por base a utilização dos *solvable* OAA, ver secção 3.2.4, definidos por cada agente durante o seu processo de registo no mercado.

Os protocolos de negociação apresentados pormenorizam e adaptam a descrição já efectuada em [Praça et al., 2003a].

5.2.4.1 Modelo em Bolsa

A negociação em Bolsa efectuar-se-á em todos os períodos de negociação, repetindo-se o protocolo, que a seguir se descreve em cada novo período.

Todo o processo é iniciado e controlado pelo Agente Operador de Mercado, uma vez que este é o responsável pelo funcionamento da Bolsa.

Protocolo de Negociação para o Modelo em Bolsa

- O Agente Operador de Mercado inicia o processo de negociação, solicitando a todos os agentes presentes no mercado o envio de propostas;
- Os Agentes Compradores e Vendedores, que pretendam e estejam em condições de o fazer, enviam então as suas propostas ao Operador de Mercado;
- O Operador de Mercado procede à análise das propostas recebidas, de acordo com o mecanismo de mercado adoptado na Bolsa, tendo em conta se se trata de um Mercado Assimétrico ou Simétrico. De notar que no caso dos Mercados Assimétricos as propostas por parte dos Agentes Compradores apenas indicam a quantidade de energia que necessitam comprar;
- O Operador de Mercado solicita ao Agente Operador de Sistema a verificação da viabilidade técnica do trânsito de potências que prevê estabelecer. A análise das propostas a serem aceites depende não só do mecanismo de mercado adoptado mas também da viabilidade técnica em termos de capacidade e segurança de funcionamento da rede eléctrica, pelo que o processo de aceitação de propostas passa também pela interação do Agente Operador de Mercado com o Agente Operador de Sistema;

- O Agente Operador de Mercado comunica aos agentes que participaram na Bolsa a aceitação, ou não, das suas propostas, e o preço de mercado estabelecido.

A figura 5.6 ilustra o protocolo de negociação em Bolsa e a troca de mensagens envolvida.

Pedido de Participação

É feito através do envio da mensagem:

participar_bolsa(tipoBolsa, Params)

- *TipoBolsa* identifica o tipo de mecanismo de mercado da Bolsa;
- *Params* indica os parâmetros que as licitações devem conter, como, a quantidade, a localização na rede eléctrica do ponto de injeção ou consumo de energia eléctrica, o preço, etc.

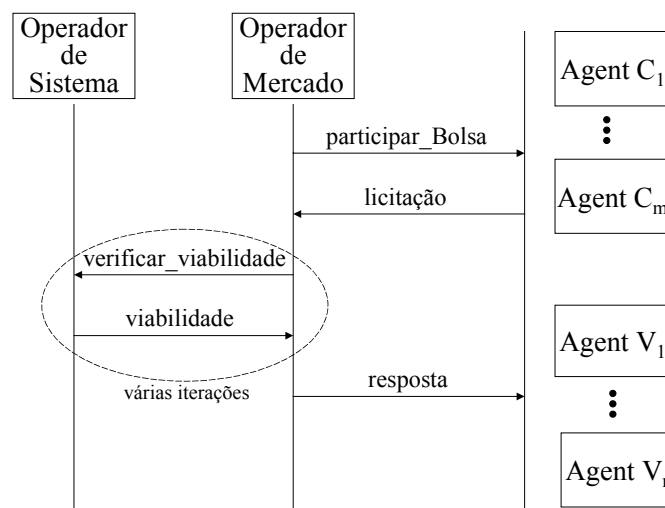


Figure 5.6: Protocolo de Negociação para o Modelo em Bolsa.

Formulação de licitações

Os Agentes Compradores e Vendedores fazem as suas licitações de acordo com as suas estratégias de negócio, a descrever no capítulo 6. Tais estratégias irão determinar em cada instante qual o preço pretendido pelo agente e se lhe é ou não vantajoso participar na Bolsa. Se é vantajoso, então o agente irá responder através do envio da mensagem:

licitação(IdAgente, Idlicitação, Params)

- *IdAgente* identifica o agente;
- *Idlicitação* é o identificador da licitação (permite que um agente faça mais do que uma licitação, por exemplo, no caso de um agente

Vendedor, poderá fazer licitações associadas a diferentes grupos geradores);

→ *Params* indica os valores propostos para os parâmetros solicitados.

Verificação da viabilidade técnica

A análise das licitações recebidas, feita pelo Operador de Mercado tendo em conta o mecanismo de mercado em vigor na Bolsa, define quais as que estão em condições de serem aceites. Após essa definição, é necessário que o Operador de Mercado verifique a viabilidade técnica de aceitação dessas licitações, pelo que terá que enviar ao Operador de Sistema a informação sobre os contratos, de injeção e consumo de energia na rede eléctrica que pretende estabelecer, de modo a garantir a sua viabilidade técnica.

De salientar uma vez mais que, embora neste momento o MASCEM não inclua qualquer algoritmo de análise técnica de redes eléctricas, foi desenvolvido e especificado a contar com essa funcionalidade. Deste modo, todo o protocolo de negociação e a troca de mensagens envolvida está preparada para a integração deste tipo de algoritmos no código do Agente Operador de Sistema, sem que a interface deste com os restantes agentes tenha de ser alterada.

A estrutura da mensagem que o Operador de Rede enviará ao Operador de Sistema é a seguinte:

verificar_viabilidade(Licitações)

→ *Licitações* é uma lista com os dados de todas as licitações, e parâmetros que as caracterizam, que, à partida serão aceites. O preço é um parâmetro que não é indicado, uma vez que é irrelevante em termos de análise técnica da rede eléctrica.

O Agente Operador de Sistema procederá à análise dos dados recebidos e mediante o estado da rede eléctrica irá indicar ao Operador de Mercado quais as licitações que tecnicamente é viável aceitar. Para tal envia-lhe a seguinte mensagem:

viabilidade(LicitaçõesAct)

→ *LicitaçõesAct* é uma lista que indica quais as licitações que podem ser aceites.

No caso de nem todas as licitações enviadas pelos Agente Operador de Mercado serem viáveis, este procederá à exclusão das licitações não viáveis e sua substituição por outras, de acordo com a prioridade estabelecida pelo mecanismo de mercado, voltando a solicitar ao Operador de Sistema a verificação da viabilidade técnica do novo conjunto de licitações.

Na prática poderão ocorrer várias iterações de troca de mensagens *verificar_viabilidade(Licitações)* e *viabilidade(LicitaçõesAct)* até que a lista *LicitaçõesAct* seja idêntica à lista *Licitações* recebida pelo Operador de Sistema.

Envio de respostas

Uma vez determinadas as licitações que serão aceites, o Operador de Mercado envia resposta a todos os agentes que participaram na Bolsa, indicando se as suas propostas foram ou não aceites, além de indicar o Preço de Mercado estabelecido para o período em causa. O envio de resposta segue a estrutura seguinte:

resposta(IdAgente, Idlicitação, Params, [aceite/rejeitada], PreçoMercado, Coment)

- *IdAgente* identifica o agente que formulou a licitação;
- *Idlicitação* identifica a licitação ;
- *Params* são os parâmetros que caracterizam a licitação aceite, uma vez que a quantidade licitada pode não ter sido totalmente aceite;
- *[aceite/rejeitada]* parâmetro que indica se a licitação foi ou não aceite;
- *PreçoMercado* indica o preço estabelecido para o período de negociação;
- *Coment* poderá ser utilizado para indicar o motivo da rejeição de uma licitação devido a questões de viabilidade técnica, de modo a que o agente não fique surpreendido pelo facto da sua licitação não ter sido aceite, ao comparar o preço que propôs com o Preço de Mercado estabelecido.

5.2.4.2 Modelo de Contratos Bilaterais

A negociação por Contratos Bilaterais é um processo de negociação em que os Agentes Vendedores e Compradores tentam, entre si, chegar a um acordo de fornecimento de energia.

O processo é iniciado pelos Agentes Compradores, que contactam os Agentes Vendedores no sentido de saber as condições por eles oferecidas no fornecimento de energia. Dessas condições faz parte a verificação, feita por parte dos Agentes Vendedores, da viabilidade técnica do contrato, que deverá ser solicitada ao Operador de Sistema.

Protocolo de Negociação para o Modelo de Contratos Bilaterais

- Um Agente Comprador inicia o processo de negociação, solicitando a todos os Agentes Vendedores presentes no mercado o envio de propostas às necessidades por si especificadas;
- Os Agentes Vendedores, que pretendam ou estejam em condições de o fazer, enviam então as suas propostas ao Agente Comprador;

- O Agente Comprador analisa todas as propostas recebidas de acordo com as suas preferências e selecciona a mais vantajosa. Caso não receba nenhuma proposta que satisfaça os seus requisitos, nomeadamente em termos do preço a que aceita negociar, poderá reinicializar as negociações, na tentativa de ser mais bem sucedido. De facto, tal poderá suceder. Por um lado, se o agente alterar os seus requisitos em termos de preço, por exemplo ao aplicar uma estratégia que lhe permita ajustar o preço pretendido à medida que decorre um período de negociação. Por outro lado, poderá receber propostas de valores diferentes, nomeadamente se os Agentes Vendedores também estiverem a ajustar os seus preços ao longo do período de negociação;
- O Agente Comprador tenta estabelecer contrato com o Agente Vendedor seleccionado. O Agente Vendedor, se ainda estiver interessado em estabelecer o contrato proposto pelo Agente Comprador, irá verificar junto do Operador de Sistema se as condições técnicas se mantêm. Se as condições técnicas se mantiverem o contrato poderá ser estabelecido. No caso de as condições técnicas se terem alterado e já não permitirem o estabelecimento do contrato, ou no caso de entretanto o Agente Vendedor já não estar, por motivos vários, interessado em estabelecer o contrato, deverá comunicá-lo ao Agente Comprador, que procederá à abordagem de outros Agentes Vendedores.

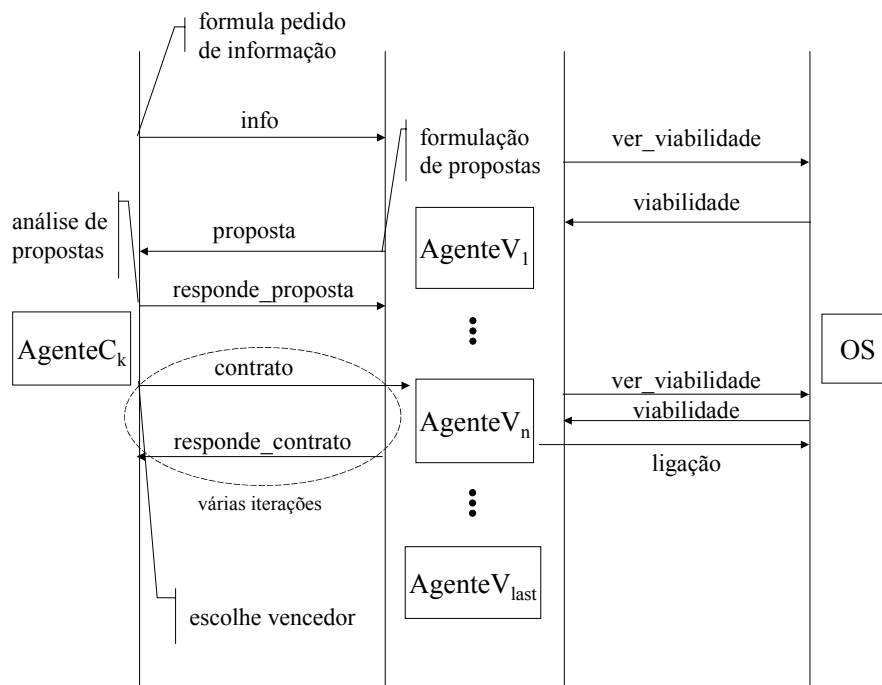


Figure 5.7: Protocolo de Negociação para Contratos Bilaterais.

A figura 5.7 ilustra o protocolo de negociação por Contratos Bilaterais, indicando a troca de mensagens entre os agentes envolvidos.

Formulação pedido informação

O Agente Comprador interessado em estabelecer negociações bilaterais irá, com base nas suas necessidades, formular um pedido de informação acerca das condições oferecidas pelos Agentes Vendedores, indicando quais as suas necessidades e local de consumo.

info(IdAgente, Params)

- *IdAgente* identifica o agente que pede a informação;
- *Params* caracteriza as necessidades do agente, sobretudo em termos da quantidade a comprar e do local de consumo.

Formulação de propostas

Os Agentes Vendedores, ao receberem um pedido, verificam se têm capacidade para satisfazer as necessidades expressas pelo Agente Comprador e analisam a viabilidade técnica de o fazerem, através do envio da informação ao Agente Operador de Sistema, que indicará face à situação da rede eléctrica nesse momento se o contrato é ou não exequível. Se ambas as condições se verificam, o Agente Vendedor definirá um preço a propor ao Agente Comprador, de acordo com a sua estratégia de negociação. No capítulo 6, ao descrever o comportamento estratégico dos agentes será de novo abordada a formulação e análise de propostas.

proposta(IdAgente, IdProposta, Params)

- *IdAgente* identifica o Agente Vendedor que responde à solicitação do Agente Comprador;
- *IdProposta* identifica a proposta;
- *Params* indica qual o preço que o Agente Vendedor propõe para estabelecimento de contrato.

A estrutura da mensagem que o Agente Vendedor enviará ao Operador de Sistema é:

verificar_viabilidade(IdProposta, Params)

- *IdProposta* identifica a proposta de contrato;
- *Params* indica o valor dos parâmetros necessários à validação técnica do contrato, como sejam a energia a transaccionar e as localizações de injeção e consumo da energia na rede eléctrica.

O Agente Operador de Sistema procederá à análise dos dados recebidos e irá indicar se a proposta de contrato é ou não viável:

viabilidade(IdProposta, [ok, n_ok])

→ *IdProposta* identifica a proposta de contrato;

→ *[ok, n_ok]* indica se o contrato pode ou não ser estabelecido.

No caso de não ser possível satisfazer o pedido expresso pelo Agente Comprador, o Agente Vendedor simplesmente não formulará qualquer proposta em resposta à solicitação expressa pelo Comprador.

Análise de propostas

O processo de análise das propostas recebidas centra-se, de momento, apenas na avaliação do parâmetro “preço”. Durante o processo de análise as propostas são ordenadas por ordem crescente de preço, sendo logo à partida excluídas as propostas cujo preço excede o valor máximo que o Agente Comprador está disposto a despendar. Aos agentes cujas propostas forem à partida eliminadas, é enviada uma mensagem indicando esse facto. De entre as propostas seleccionadas, o Agente Comprador começa por contactar o Agente Vendedor cuja proposta foi a de preço mais baixo, no sentido de estabelecerem contrato. Uma vez que as condições podem entretanto ter sofrido alteração, o Agente Vendedor terá que, de novo, verificar se continua a possuir capacidade de o satisfazer, uma vez que entretanto poderá ter efectuado outros negócios, e verificar a viabilidade técnica do contrato. Caso continuem a existir as condições necessárias é então estabelecido o contrato. No caso de não ser viável, o Agente Vendedor informa o Comprador dessa situação, passando este a contactar o Agente Vendedor que apresentou a melhor das restantes propostas válidas. Este processo de estabelecimento de contrato poderá sofrer algumas iterações até que se encontre uma proposta que se mantenha válida. Nesse caso, o Agente Vendedor terá que comunicar ao Operador de Sistema o estabelecimento do contrato.

As mensagens trocadas são:

contrato(IdAgente, IdProposta, Params)

→ *IdAgente* identifica o agente que solicita o estabelecimento de contrato;

→ *IdProposta* identifica a proposta;

→ *Params* indica os parâmetros do contrato a estabelecer, representando as necessidades do Agente Comprador e as condições propostas pelo Vendedor.

responde_proposta(IdAgente, IdProposta, [rejeitada])

→ *IdAgente* identifica o agente que solicitou a proposta;

→ *IdProposta* identifica a proposta;

→ *[rejeitada]* parâmetro que indica que a proposta não foi aceite.

responde_contrato(IdAgente, IdProposta, [ok, n_ok])

→ *IdAgente* identifica o agente que vai fornecer a energia;

→ *IdProposta* identifica a proposta em vigor no contrato;

→ *[ok, n_ok]* indica se o contrato pode ou não ser estabelecido.

5.2.4.3 Modelo Misto

Quando se trata de simular um mercado baseado num Modelo Misto, os Agentes Compradores podem à partida definir as suas intenções de compra por Contratos Bilaterais e por Bolsa. Essas intenções podem variar ao longo dos períodos de negociação, nomeadamente através dos resultados que vão sendo obtidos e/ou através das análises feitas com o Algoritmo de Análise de Cenários.

Por exemplo, se a análise de cenários possíveis indica um determinado preço previsto para a Bolsa e o agente é confrontado com a possibilidade de estabelecer um Contrato Bilateral a melhor preço, poderá mudar as suas intenções iniciais de licitar na Bolsa.

Do mesmo modo, os Agentes Vendedores podem definir à partida as suas intenções de venda por Contratos Bilaterais e em Bolsa. Com o desenrolar das negociações, ou face ao valor estimado para o preço a estabelecer na Bolsa, poderão optar por apostar mais na Bolsa, em detrimento de um Contrato Bilateral, se, à partida, a Bolsa sugerir um melhor negócio, revendo, de acordo com os resultados que na realidade se vierem a verificar a sua estratégia para o período seguinte.

O que muda não é a troca de mensagens entre os agentes, mas sim a tomada de decisão por parte dos agentes, que face às duas possibilidades de estabelecer negócios terão que decidir por qual optar ou em qual investir mais. O comportamento estratégico dos agentes, as análises feitas com o Algoritmo de Análise de Cenários e a análise de resultados históricos são determinantes nesse processo, e serão abordados em pormenor no capítulo 6.

Uma vez definidas as intenções do agente relativamente às percentagens a negociar em Bolsa e por Contratos Bilaterais, este poderá:

- ainda antes de efectuar a sua licitação à Bolsa, optar por incluir parte, ou toda, a quantidade de energia que tinha previsto negociar por Contratos Bilaterais na licitação, tendo em conta o desenrolar do processo de estabelecimento de Contratos Bilaterais até à altura de envio das licitações à Bolsa;

- uma vez obtidos os resultados da Bolsa e caso não tenha sido possível ao agente negociar toda a quantidade pretendida, aumentar as quantidades a transaccionar por Contratos Bilaterais.

A figura 5.8 representa as decisões que o agente tem que tomar, em cada período de negociação, face à possibilidade de negociar das duas formas.

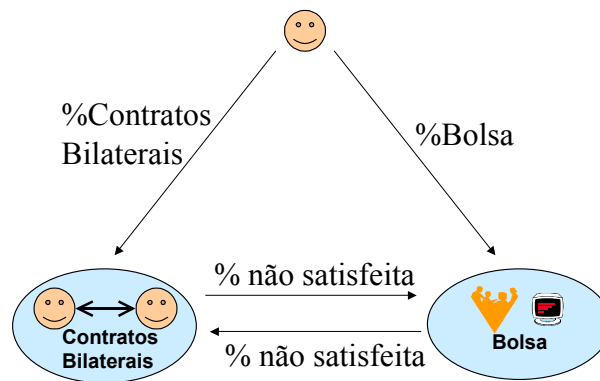


Figure 5.8: Decisões a tomar em Modelos Mistos.

Assim, neste modelo de negociação, os Agentes Vendedores, Compradores e Comercializadores, para além das decisões que se prendem com a formulação de licitações e propostas e avaliação das mesmas, têm ainda que decidir:

- percentagens iniciais a negociar em Bolsa e em Contratos Bilaterais;
- que quantidade da energia que não tenha sido possível negociar por Contratos Bilaterais se deve adicionar às licitações à Bolsa.

Todas as decisões relativas à negociação entre agentes serão abordadas no capítulo 6, juntamente com a exposição sobre o comportamento estratégico dos agentes.

5.3 Conclusões

Neste capítulo foi definido o modelo multi-agente do MASCEM e apresentadas as características dos agentes presentes, tendo sido também descrita uma ontologia relacionada com a transacção de energia entre as entidades do mercado.

Relativamente aos Agentes Comprador, Vendedor e Comercializador, por desempenharem papel fundamental no desenrolar da actividade comercial do mercado de energia, as suas características e estrutura foram detalhadas.

Foram definidos os protocolos de negociação para cada um dos tipos de modelo de mercado incluídos no simulador, tendo sido descritas, para cada caso, as interações entre os agentes. Assim, descreveu-se em pormenor o protocolo de troca de mensagens entre os agentes para negociações em Bolsa, Contratos Bilaterais e modelos Mistos. As decisões que os agentes têm de tomar ao longo do processo de negociação, desde a formulação à análise de propostas, foram referidas de forma sucinta, uma vez que serão alvo de análise e descrição detalhada no próximo capítulo.

No próximo capítulo analisa-se o comportamento dos agentes e o seu processo de tomada de decisão.

Capítulo 6

MASCEM: Comportamento dos Agentes – Estratégias Dinâmicas e Análise de Cenários

Este capítulo dedica-se essencialmente a descrever o Módulo de Tomada de Decisão dos agentes do sistema MASCEM. Descrevem-se as estratégias que os agentes podem utilizar durante e entre períodos de negociação. Descreve-se ainda o Algoritmo de Análise de Cenários, que, com base na informação que o agente recolhe ao longo do processo de negociação, permite fazer uma análise de vários cenários admissíveis, sugerindo opções a tomar.

A terminar o capítulo, compara-se o MASCEM com os simuladores já apresentados no capítulo 4.

Introdução

Como já foi referido, são vários os modelos de mercado englobados no nosso simulador: negociação em Bolsa, Contratos Bilaterais e Mercados Mistos. Os principais participantes no processo de negociação são os Agentes Vendedores, os Compradores, e os Comercializadores, que, no fundo, actuam no processo de negociação de forma semelhante à dos Compradores, tendo no entanto a obrigatoriedade de abastecimento dos consumidores que representam.

Em cada um dos tipos de negociação, estes agentes vêm-se confrontados com uma série de decisões e análises, que vão desde a formulação de propostas, à Bolsa ou em processos de estabelecimento de Contratos Bilaterais, à análise de propostas recebidas por parte de outros agentes no mercado, no caso da negociação bilateral, à opção de negociar, ou não, em Bolsa ou por Contratos Bilaterais. Tais decisões são fundamentais para que o agente alcance os seus objectivos.

É o comportamento do agente que dita a forma como ele reage em cada situação. O comportamento do agente é ditado pelo seu módulo de Tomada de Decisão, já referido no capítulo 5, o qual engloba as suas várias estratégias.

O MASCEM destina-se ao estudo dos mercados *spot* de energia eléctrica, habitualmente subdivididos em 24 ou 48 períodos de negociação, correspondentes, respectivamente, às 24 horas ou 48 meias horas do dia seguinte. Assim, os agentes são dotados de estratégias para definição do preço a propor ao longo de um mesmo período de negociação e entre períodos de negociação. A definição do preço é feita tendo em conta as características e objectivos do agente, nomeadamente as quantidades que pretende vender e o preço limite que admite, e ainda tendo em conta os resultados obtidos nos períodos de negociação anteriores.

O módulo de Tomada de Decisão dos agentes inclui ainda um algoritmo, de Análise de Cenários. Este algoritmo permite, com base na informação que o agente detém sobre o mercado e os outros agentes presentes nesse mercado, informação contida no Módulo de Conhecimento Individual e de Mercado, que o agente analise vários cenários sob várias perspectivas, estimando os resultados futuros. Deste modo os agentes poderão analisar várias decisões, conseguindo ter uma estimativa sobre a evolução do mercado, e assim sustentar as suas opções.

Neste capítulo é feita a descrição das estratégias e do Algoritmo de Análise de Cenários. A sua ilustração através da análise experimental de alguns cenários é feita no próximo capítulo.

6.1 Comportamento dos Agentes

O MASCEM é um sistema que permite a negociação automática entre agentes. São vários os mecanismos de negociação que é possível estudar com o MASCEM. Mecanismos esses que se encontram nos mercados *spot* de energia eléctrica.

Neste tipo de mercados, um dia encontra-se dividido em 24 ou 48 períodos de negociação consecutivos, que correspondem, respectivamente, às horas ou meias-horas do dia seguinte. Assim, no MASCEM as negociações para cada período têm uma determinada duração, finda a qual se inicia o processo de negociação para o período seguinte. As negociações têm por isso uma componente temporal finita, sendo:

- **N_p** o número de períodos de negociação em análise;
- **D** a duração de cada período de negociação;
- **i a** identificação de um período de negociação.

Os agentes observam o mercado e ajustam os preços das suas propostas com base na evolução temporal, nas alterações do mercado, nos resultados que vão obtendo, e no conhecimento que detêm sobre o mercado, e sua evolução futura, e sobre o comportamento dos outros agentes. A informação dos agentes relativamente a alguns destes aspectos é uma informação incompleta, uma vez que, ainda que saibam que os outros agentes usam, por exemplo, uma estratégia dependente do tempo, não sabem de que estratégia se trata.

A negociação é, em cada período, efectuada com base num único critério, o preço. Trata-se, por isso, de um problema de negociação com base num critério único, restrições temporais e informação incompleta. Futuramente o modelo será estendido de modo a incluir negociações multi-critério, em que alguns dos critérios a analisar, para além do preço, serão, por exemplo, a confiança no parceiro de negociação e a qualidade de serviço. Aliás, o modelo do MASCEM está já preparado para tal, uma vez que alguns parâmetros que permitirão incluir esse tipo de critérios fazem já parte da informação que os agentes contêm no seu módulo de Conhecimento Individual e de Mercado. Em [Fatima et al., 2002] analisa-se a negociação bilateral multi-critério.

Os resultados de um agente num processo de negociação dependem de vários parâmetros, como as suas preferências, os seus limites de aceitação, e as estratégias que usam. Num sistema de negociação automática a estratégia de negociação de um agente é o plano de acção usado por esse agente com o intuito de atingir o seu objectivo, geralmente expresso através da maximização da sua função de utilidade [Fatima et al., 2001]. No MASCEM os agentes são dotados de estratégias que ditam o seu comportamento durante um período de negociação e entre períodos de negociação.

6.1.1 Caracterização dos Agentes

Os principais intervenientes no processo de negociação são os Agentes Vendedores e Compradores. Os Comercializadores actuam de forma idêntica aos Compradores, sendo no entanto os seus limites de aceitação de propostas dependentes dos contratos previamente estabelecidos com os seus clientes, uma vez que têm que satisfazer as suas necessidades. Dada a semelhança de comportamento estratégico entre Agentes Compradores e Comercializadores, este será descrito em simultâneo na secção relativa aos Agentes Compradores, sendo, sempre que necessário, feitas as devidas ressalvas.

Seja:

- **c** o Agente Comprador, ou Comercializador;
- **v** o Agente Vendedor.

Durante cada um dos tipos de negociação, são várias as propostas e contra-propostas trocadas pelos agentes. O objectivo dos Agentes Vendedores é o de conseguirem vender toda a energia gerada ao maior preço possível, enquanto que o objectivo dos Compradores, e Comercializadores, é o de comprar a energia que necessitam, ao mais baixo preço possível. Ou seja, Vendedores e Compradores negociam entre si até que cheguem a um acordo.

6.1.1.1 Agente Vendedor

Durante o processo de negociação, para responder a solicitações de participação na Bolsa e de estabelecimento de Contratos Bilaterais, tal como já foi descrito no capítulo 5, os Agentes Vendedores recorrem às seguintes mensagens:

$Msg = \{ \textit{licitação}, \textit{proposta} \}$

Seja:

- L_v^i a licitação do Agente Vendedor **v** à Bolsa, no período **i**;
- $Pp_{v \rightarrow c}^i$ a proposta do Agente Vendedor **v** efectuada ao Agente Comprador **c**, no período de negociação **i**.

As licitações e propostas são feitas com base nos valores de aceitação do Agente Vendedor para o critério de negociação. Para já, no nosso caso, trata-se apenas do preço.

Esse preço poderá, no limite, ser idêntico ao preço de custo da energia que o Agente Vendedor consegue produzir.

Sendo:

- Pv_{lim} o preço limite do agente, abaixo do qual não está, à partida, disposto a estabelecer negócios;
- Pv_{pret}^i o preço a que, à partida, o agente está interessado em conseguir vender a energia que produz, no período i .

Tendo em conta os preços limite e pretendido pelo Agente Vendedor, o intervalo para formulação de propostas no período de negociação i será:

$$[Pv_{lim}, Pv_{pret}^i]$$

No entanto, e uma vez que o seu objectivo é obter o maior lucro possível, o intervalo de aceitação de propostas, no início das negociações, será:

$$[Pv_{pret}^i, \infty]$$

Este intervalo vai sendo alterado à medida que decorrem as negociações, no caso de o agente se ver na necessidade de relaxar as suas preferências, podendo no limite passar a ser $[Pv_{lim}, \infty]$.

Ao longo do período de negociação, com base na estratégia de definição de preço durante um período de negociação, o preço pretendido pelo agente, Pv_{pret}^i , vai sendo modificado. Com a mudança de período de negociação, o agente analisa os resultados conseguidos, e com base na sua estratégia de definição de preço entre períodos de negociação e/ou nos resultados do Algoritmo de Análise de Cenários, define o valor para Pv_{pret}^{i+1} .

O preço Pv_{lim} mantém-se, uma vez que faz parte das características intrínsecas do agente, estando relacionado, por exemplo, com os custos associados ao tipo das suas centrais de produção de energia eléctrica.

Os parâmetros a ter em conta durante o processo de negociação são, para além do seu preço limite, preço preferido, função de utilidade e estratégia, a percepção que detém sobre a evolução do mercado e o preço a propor pelos outros agentes no mercado.

Assim, a informação do agente sobre os parâmetros de negociação é:

$$I_v = (Pv_{lim}, Pv_{pret}^i, Ut_v, Estr_v, I_{Mercado}, I_{v \rightarrow c})$$

em que:

- Ut_v representa a função utilidade do agente;

- $Estr_v$ as suas estratégias;
- $I_{Mercado}$ a informação que detém sobre o Mercado e sua evolução futura;
- $I_{v \rightarrow c}$ a informação que detém sobre o Agente Comprador c .

Analisa-se em seguida o processo de formulação de licitações e propostas.

Formulação de Licitações

Durante um determinado período de negociação i a licitação de um Agente Vendedor é feita com base no preço pretendido no instante em que é feito o pedido de participação à Bolsa. Ou seja, sendo t o instante em que é solicitado o envio de licitações à Bolsa, a licitação do Agente Vendedor v , é:

$$L_v^i = P_{pret}^i(t) \quad (6.1)$$

A licitação, para além do preço proposto pelo agente, inclui ainda parâmetros relacionados com a quantidade de energia que o agente pode vender e com a sua localização, de forma a ser possível desencadear o processo de análise da rede.

Em *Interagent Communication Language* (ICL), a linguagem de comunicação entre agentes da plataforma de suporte *Open Agent Architecture*, a licitação é construída da seguinte forma:

```
answers.iclAddToList( new IclStruct( "licitacao", new IclInt(En_bolsa), new
IclFloat(Price), new IclStr("Local")) );
```

De notar que, no caso de participação na Bolsa, os agentes terão que aceitar o preço estabelecido. No entanto, os agentes estão livres de decidir sobre a sua participação, ou não, na Bolsa. Para suportar esta decisão, podem recorrer à análise de cenários e estimativa dos resultados previstos, através do Algoritmo de Análise de Cenários, exposto na secção 6.1.3 deste capítulo.

No caso dos Contratos Bilaterais, o agente poderá aceitar vender a energia produzida a um preço inferior ao pretendido nos casos em que lhe seja preferível aceitá-lo em vez de parar a produção, por tal ser, por exemplo, inviável ou ter custos elevados.

Formulação de Propostas

Durante as negociações para estabelecimento de Contratos Bilaterais, e tal como exposto no capítulo 5, pode ser solicitada ao Agente Vendedor, por parte de um Agente Comprador, uma proposta à satisfação das suas necessidades de compra de energia.

A proposta que o Agente Vendedor irá elaborar terá por base, tal como nas licitações à Bolsa, o preço pretendido no instante t em que é feita a solicitação, ou seja:

$$P_{p_{v \rightarrow c}}^i(t) = P_{pret}^i(t) \quad (6.2)$$

Um Agente Vendedor, ao receber um pedido no sentido de estabelecer uma negociação bilateral, terá que analisar se a energia de que dispõe é suficiente para satisfazer o pedido formulado e de que é fisicamente possível transportar a energia do local onde se encontra o gerador até ao local de consumo, pelo que é solicitada a análise de viabilidade técnica ao Agente Operador de Rede.

Em ICL, a proposta é construída da seguinte forma:

```
float En_pedida = Float.valueOf(goal.iclNthTerm(1).toString()).floatValue();
String Local_destino = goal.iclNthTerm(3).toString();
if (En_cb >= En_pedida)
    if ( super.myoaa.oaaSolve ( IclUtils.icl( "viabilidade(" + En_pedida + "," +
        Local_destino + "," + Local + ")" ), params, answers)){
        answers.iclAddToList(newIclStruct("proposta", IclUtils.icl(En_pedida), new
            IclFloat(Price), IclUtils.icl(Local_destino)));
    }
```

No entanto, no caso dos Contratos Bilaterais, tendo em conta a informação relativa ao histórico de negociações entre o Agente Vendedor e o Agente Comprador, solicitador do contrato, o preço a propor poderá ser desde logo diferente do preço pretendido pelo agente nesse instante t .

Assim, o Agente Vendedor pode utilizar o Algoritmo de Análise de Cenários apenas para análise de cenários do comportamento do Agente Comprador solicitador do contrato. Para tal, a informação que detém sobre esse agente, $I_{v \rightarrow c}$, é fundamental. Ainda que o agente não detenha informação completa sobre o Agente Comprador, vai, à medida que as negociações decorrem, aumentando esse conhecimento.

6.1.1.2 Agente Comprador

As necessidades de consumo variam ao longo do dia, tendo em conta os diagramas de carga típicos para diferentes tipos de consumidores. Por isso, cada carga tem associado um consumo em horas de vazio, de cheia e de ponta.

As mensagens trocadas no âmbito do processo de negociação são:

$Msg = \{ licitação, info \}$

Seja:

- L_c^i a licitação do Agente Comprador c à Bolsa, no período i ;

As licitações e a avaliação de propostas de estabelecimento de Contratos Bilaterais são feitas com base nos valores de aceitação do Agente Comprador para o critério de negociação, que, no nosso caso, é o preço. Assim, a função utilidade dos agentes apenas depende do preço que conseguem obter, sendo a utilidade tanto maior quanto menor for o preço.

Sendo:

- Pc_{lim} o preço limite do agente, acima do qual não está, à partida, disposto a estabelecer negócios. No caso dos Agentes Comercializadores, este preço é definido à custa dos contratos previamente estabelecidos com os Compradores que representa e às suas aspirações em termos de lucro a obter;
- Pc_{pret}^i o preço a que, à partida, o agente está interessado em conseguir comprar a energia de que necessita.

O intervalo para formulação de propostas, com base nos preços pretendido e limite do agente será:

$$[Pc_{pret}^i, Pc_{lim}]$$

No entanto, tendo em conta que quanto mais baixo for preço da energia melhor, uma vez que o agente pretende satisfazer as suas necessidades ao mais baixo preço possível, o intervalo de aceitação de propostas será:

$$[0, Pc_{pret}^i]$$

À medida que as negociações vão decorrendo, o preço vai sendo alterado, com base no comportamento estratégico do agente, podendo o intervalo de aceitação de propostas ser alargado até:

$$[0, Pc_{lim}]$$

Os agentes cujas necessidades de consumo são elásticas, ou seja, que, por exemplo, poderão deslocar os seus consumos para outros períodos, respeitarão, à partida, estes limites. Para os agentes cujas necessidades de consumo são inelásticas, o preço de compra poderá mesmo ultrapassar o Pc_{lim} .

Os parâmetros a ter em conta durante a negociação são, à semelhança dos Agentes Vendedores, o seu preço limite, preço preferido, função de utilidade, estratégia, a informação que detém sobre os outros agentes no mercado, sobretudo relativamente aos preços pretendidos.

Assim, a informação do agente sobre os parâmetros de negociação é:

$$Ic = (Pc_{lim}, Pc_{pret}^i, Ut_c, Estr_c, I_{Mercado}, I_{c \rightarrow v})$$

em que:

- Ut_c representa a função utilidade do agente;
- $Estr_c$ as suas estratégias;

- $I_{Mercado}$ a informação que detém sobre o Mercado e sua evolução futura;
- $I_{c \rightarrow v}$ a informação que o Agente Comprador **c** detém sobre o Agente Vendedor **v**.

De salientar que nas plataformas que se aproximam de alguma forma do MASCEM, analisadas no capítulo 4, os agentes que representam os compradores de energia eléctrica, não apresentam comportamento estratégico, sendo por isso, este um aspecto importante a salientar no nosso trabalho.

Em seguida analisa-se o processo de formulação de licitações e avaliação de propostas por parte dos Agentes Compradores e a forma como o seu intervalo de aceitação vai sendo alterado à medida que decorrem as negociações, com base nos resultados que vão sendo obtidos.

Formulação de Licitações

Durante um determinado período de negociação **i**, a licitação de um Agente Comprador à Bolsa será feita com base no preço pretendido para o instante em que é solicitada a participação na Bolsa. Sendo **t** esse instante, a licitação de um Agente Comprador **c**, será:

$$L_c^i = Pc_{pret}^i(t) \quad (6.3)$$

Os agentes poderão optar por licitar ou não na Bolsa. No entanto, se o fizerem, tal como os Agentes Vendedores, terão que aceitar o preço estabelecido.

A decisão de licitar ou não na Bolsa poderá estar definida à partida, ou ser dependente da análise do agente no decorrer das negociações. Neste caso, os agentes recorrem à análise de cenários e estimativa dos resultados previstos, através do Algoritmo de Análise de Cenários, exposto mais à frente neste capítulo.

Avaliação de Propostas

Os Agentes Compradores interessados em estabelecer Contratos Bilaterais abordam o mercado através de um pedido de propostas às suas necessidades. Os Agentes Vendedores, interessados na possibilidade de estabelecer contrato com esse agente, enviam uma proposta, apresentando o preço que pretendem, ao Comprador. Este terá então que analisar as propostas recebidas e optar por uma delas, caso alguma satisfaça as suas condições e preço pretendido. Caso contrário, voltará a iniciar o processo de pedido de propostas, alterando, ou não, os seus requisitos iniciais, e aguardar por respostas mais favoráveis.

O intervalo de variação de preço em que este é aceitável para ambos os agentes, Vendedor e Comprador, é:

$$[Pv_{lim}, Pc_{lim}]$$

Se $Pv_{lim} > Pc_{lim}$ não haverá possibilidade de os agentes virem a estabelecer um Contrato Bilateral. Se $Pv_{lim} \leq Pc_{lim}$ é possível que os agentes venham a estabelecer um contrato.

Por exemplo, no caso ilustrado na figura 6.1, é possível que os agentes venham a chegar a um acordo. No entanto, tendo em conta os preços pretendidos à partida, tal acordo só poderá ser estabelecido após algumas iterações. À medida que as negociações forem decorrendo e os agentes forem concluindo que terão que relaxar as suas preferências, no caso dos Agentes Vendedores, irão diminuir o preço pretendido, e, no caso dos Compradores, aumentar o preço pretendido. Quando esses preços estiverem dentro da região de aceitação e $Pc_{pret} \geq Pv_{pret}$, então é que será possível que os agentes cheguem a um acordo.

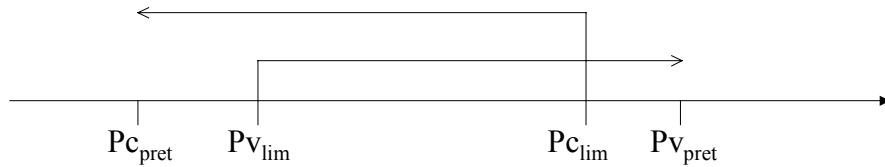


Figura 6.1: Situação em que ainda não há acordo entre os Agentes.

No caso de $Pc_{pret} > Pv_{pret}$, haverá desde logo o acordo do Agente Comprador em aceitar a proposta enviada pelo Agente Vendedor. Esta situação está ilustrada na figura 6.2.

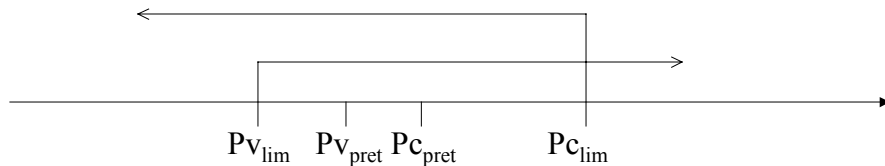


Figura 6.2: Situação em que é possível chegar a acordo entre os Agentes.

Ao fazer a abordagem ao mercado no sentido de estabelecer um Contrato Bilateral, um Agente Comprador pode receber várias propostas provenientes de vários Agentes Vendedores. A análise das várias propostas recebidas é também feita com base num critério único, o preço, estando prevista futuramente a consideração de outros critérios como, por exemplo, a satisfação com o Vendedor em contratos prévios, dados já incluídos nas estruturas de informação do Módulo de Conhecimento Individual e de Mercado dos agentes.

6.1.2 Estratégias Dinâmicas

Nesta secção descrevem-se as estratégias dos agentes. De notar que Agentes Vendedores e Compradores têm estratégias cujo princípio de funcionamento é o mesmo, mas que são usadas de forma a alterar a preço de maneira diferente.

À medida que decorrem as negociações, os Agentes Vendedores não tendo bons resultados, terão que baixar o preço pretendido, ao contrário dos Agentes Compradores, que, no caso de não estarem a ser bem sucedidos nas negociações, terão que subir o preço a que pretendem comprar a energia eléctrica.

Nesta secção as estratégias são apresentadas de forma genérica, realçando-se, sempre que necessário, de que forma serão utilizadas por Vendedores e Compradores.

Existem dois tipos de estratégias: estratégias que alteram o preço dos agentes durante um período de negociação e estratégias que alteram o preço dos agentes entre períodos de negociação. As primeiras, são estratégias dependentes do tempo, uma vez que dependem essencialmente do tempo decorrido, as segundas são estratégias dependentes do comportamento, uma vez que dependem dos resultados obtidos em períodos de negociação anteriores.

6.1.2.1 Durante um Período de Negociação

As estratégias que alteram o preço dos agentes durante um período de negociação são de quatro tipos diferentes, no entanto, todas elas são baseadas no ajuste do preço a propor com base no instante t de negociação, em função da duração D de cada período de negociação. São designadas por:

- Determinada;
- Ansiosa;
- Moderada;
- Gulosa.

Todas elas têm o mesmo princípio de funcionamento, baseado em:

$$\text{para os Agentes Vendedores: } P_{pret}^i(t) = P_{lim} + (1 - f(t))(P_{pret}^i(0) - P_{lim}) \quad (6.4)$$

$$\text{e para os Compradores: } P_{pret}^i(t) = P_{pret}^i(0) + f(t)(P_{lim} - P_{pret}^i(0)) \quad (6.5)$$

com $0 \leq f(t) \leq 1$.

Através da definição e variação de $f(t)$ é possível definir uma variedade enorme de estratégias. É comum que essa variação se faça recorrendo a funções polinomiais ou exponenciais [Faratin et al., 1998].

A principal diferença entre as estratégias implementadas é o instante t a partir do qual o preço começa a ser alterado e a percentagem de alteração do preço, que pode ser fixa ou função do tempo que resta para negociar $(D - t)/D$.

A estratégia Determinada pura e simplesmente mantém o preço inalterado. Por outro lado, a estratégia Gulosa é, de todas as restantes, a que mantém a proposta inicial durante mais tempo, quase até final do período de negociação, mas também a que faz alterações mais significativas ao preço.

No caso dos Agentes Vendedores, a alteração no preço pretendido será no sentido da sua diminuição, enquanto que, no caso dos Agentes Compradores a alteração do preço pretendido, à medida que decorre o período de negociação, será no sentido de o aumentar.

Deste modo, ainda que no início do período de negociação possa não haver acordo entre os agentes, por exemplo por os seus preços serem semelhantes aos representados na figura 6.1, ao longo do período de negociação, à medida que o Agente Vendedor baixa o seu preço pretendido e o Comprador sobe o seu preço pretendido, poderá chegar-se a uma situação idêntica à representada na figura 6.2, passando a ser possível estabelecer um acordo entre ambos.

6.1.2.2 Entre Períodos de Negociação

Foram desenvolvidas e implementadas duas estratégias que alteram o preço pretendido pelos agentes entre períodos de negociação.

Uma das estratégias, designada por Estratégia Composta Dirigida ao Objectivo (*Composed Goal Directed* - CGD), baseia-se na análise da satisfação das necessidades do agente no período anterior. A outra estratégia, designada por *Derivative Following Adaptada* (*Adapted Derivative Following* – ADF) analisa as alterações feitas ao preço pretendido pelo agente no período anterior e de que modo essa alteração afectou os seus resultados, seguindo o princípio de funcionamento proposto em [Greenwald e Kephart, 1999] e [Kephart et al., 2000].

As estratégias apresentadas definem de que forma o preço pretendido pelo agente, para o período de negociação em causa, vai ser alterado, se no sentido crescente ou decrescente. Assim, em ambos os casos, a alteração do preço é feita com base na fórmula:

$$\text{preço}_{i+1} = \text{preço}_i \pm \text{quant}_{i+1} \quad (6.6)$$

Estas estratégias começaram por ser apresentadas em [Praça et al., 2002] e mais tarde em [Praça et al., 2004a], onde foram também analisadas e comparadas.

De salientar que as principais vantagens apresentadas por estas estratégias são o facto de requererem pouca informação acerca dos restantes agentes presentes no mercado e de serem de fácil implementação. Aliás, a análise feita em [Kephart et al., 2000] e, mais

recentemente reforçada em [Morris et al., 2003], aponta precisamente no sentido do bom desempenho deste tipo de estratégias em situações em que o conhecimento relativamente aos outros participantes no mercado é reduzido.

Composed Goal Directed

Com esta estratégia os preços são alterados tendo em conta dois objectivos, o de se conseguir satisfazer plenamente as necessidades de energia eléctrica, quer em termos da necessidade de vender a energia gerada, quer em termos da necessidade de compra, ao maior lucro possível.

Deste modo, no caso dos Agentes Vendedores, enquanto não se conseguir vender toda a energia produzida o objectivo que prevalece é o de conseguir vender mais energia, pelo que se vai baixando o preço. A partir do momento em que se consegue atingir esse objectivo, o preço passa a ser incrementado, na perspectiva de continuar a vender tudo mas conseguindo um lucro maior. Ou seja, se já se atingiu um período de negociação em que ainda não se conseguiu vender toda a energia produzida, o Agente Vendedor vai baixar o preço de forma a tentar ser mais competitivo e atingir esse objectivo. Se, num determinado período consegue atingir esse objectivo, então vai tentar melhorar o seu lucro, fazendo pequenos incrementos de preço no período seguinte de modo a tentar não prejudicar a sua competitividade mas na perspectiva de melhorar o seu lucro.

No caso dos Compradores a situação é de certa forma inversa. Enquanto não surge um período em que o agente consegue comprar toda a energia que necessita, o agente vai subindo o preço a que pretende comprar a energia. A partir do momento em que o consegue, então tenta, com pequenos ajustes de preço, baixá-lo de modo a conseguir a comprar toda a energia de que necessita mas com menores gastos.

Ou seja, esta estratégia traduz-se em:

$$\text{preço}_{i+1} = \text{preço}_i + (\text{var}_i * \text{quant}_{i+1}) \quad (6.7)$$

em que:

$$\text{no caso dos Agentes Vendedores: } \text{var}_i = \begin{cases} -1 & \text{se } \text{En_vendida}_i < \text{En_produzida}_i \\ +1 & \text{se } \text{En_vendida}_i == \text{En_produzida}_i \end{cases} \quad (6.8)$$

$$\text{e no caso dos Compradores: } \text{var}_i = \begin{cases} -1 & \text{se } \text{En_comprada}_i == \text{En_consumir}_i \\ +1 & \text{se } \text{En_comprada}_i < \text{En_consumir}_i \end{cases} \quad (6.9)$$

Adapted Derivative Following

Neste caso os preços são alterados com base nos resultados do período anterior, relativamente ao que previamente havia conseguido, face às alterações feitas ao preço nesse período.

Sempre que a alteração, aumento ou redução, feita por um Agente Vendedor ao preço pretendido resultar num aumento do lucro por ele conseguido nesse período de negociação, o agente manterá o mesmo sentido de alteração do preço para o período seguinte. Ou seja, se tinha aumentado o preço pretendido, e com isso conseguiu melhores resultados, então continua a aumentar o preço pretendido. Se, por outro lado, aumentou o preço e com isso os seus resultados pioraram, então vai tentar que com a sua redução os resultados melhorem.

Os Compradores, por seu lado, actuam da mesma forma, tendo em conta que para eles um melhor resultado é a redução dos gastos com a aquisição da energia que necessitam de comprar.

Ou seja, esta estratégia traduz-se em:

$$\text{preço}_{i+1} = \text{preço}_i + \text{var_quant}_{i+1} \quad (6.10)$$

sendo

$$\text{var_quant}_{i+1} = \text{var}_i * \text{var}_{i-1} * \text{quant}_{i+1} \quad (6.11)$$

em que

$$\text{no caso dos Agentes Vendedores: } \text{var}_i = \begin{cases} -1 & \text{se lucro}_i < \text{lucro}_{i-1} \\ +1 & \text{se lucro}_i > \text{lucro}_{i-1} \end{cases} \quad (6.12)$$

$$\text{e no caso dos Compradores: } \text{var}_i = \begin{cases} -1 & \text{se gastos}_i > \text{gastos}_{i-1} \\ +1 & \text{se gastos}_i < \text{gastos}_{i-1} \end{cases} \quad (6.13)$$

$$\text{em ambos casos: } \text{var}_{i-1} = \begin{cases} -1 & \text{se preço}_i < \text{preço}_{i-1} \\ +1 & \text{se preço}_i > \text{preço}_{i-1} \end{cases} \quad (6.14)$$

Variação de preço

A quantidade de variação do preço, quant_{i+1} , é calculada da mesma forma em ambas as estratégias e depende de como o agente satisfaz no período anterior o seu objectivo de vender, no caso dos Vendedores, ou comprar, no caso dos Compradores, tudo aquilo que necessitava. Ou seja, a fórmula para obter quant_{i+1} foi definida tendo em conta que, no nosso caso particular, um dos objectivos, qualquer que seja a estratégia do agente, será sempre vender ou comprar, toda a energia pretendida. Deste modo, quanto mais longe se estiver de o conseguir maior será a alteração a efectuar ao preço.

$$\text{quant}_{i+1} = \text{preço}_i * \left(\beta + \frac{\text{En_período}_i - \text{En_vendida}_i(\text{ou comprada}_i)}{\text{En_período}_i * \alpha} \right) \quad (6.15)$$

em que α e β são apenas factores de escala, cujo valor irá ditar a gama de variação pretendida para o preço.

Em qualquer das estratégias, as rectificações no preço pretendido são sempre feitas tendo em atenção os preços limite estabelecidos para os agentes, preços máximos de compra no caso dos Agentes Compradores e preços mínimos de venda no caso dos Agentes Vendedores, de modo a que estes não sejam ultrapassados, já que, à partida, o agente não tem interesse em os ultrapassar.

6.1.3 Algoritmo de Análise de Cenários

O Algoritmo de Análise de Cenários (AAC) destina-se a ajudar os agentes no seu processo de tomada de decisões. Consiste no estudo de vários cenários, construídos com base no conhecimento que o agente detém no seu Módulo de Conhecimento Individual e de Mercado. As principais ideias começaram por ser esboçadas em [Praça, et al., 2001b], tendo em [Praça, et al., 2003b] sido descrito o algoritmo com mais pormenor.

A figura 6.3 ilustra os passos deste algoritmo.

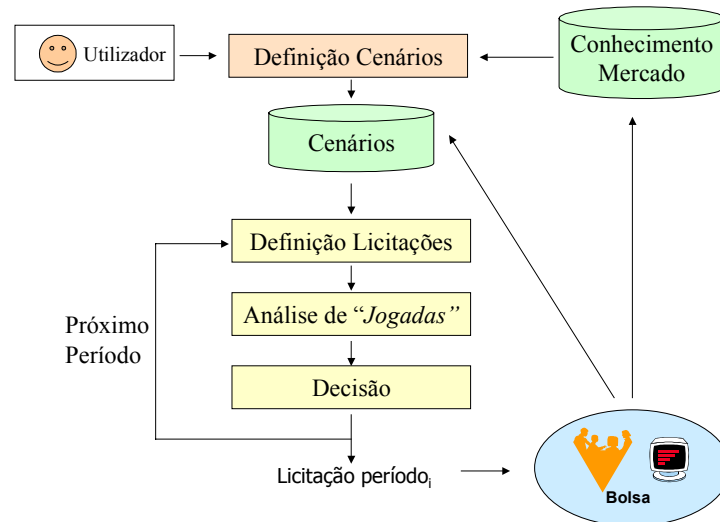


Figura 6.3: Algoritmo Análise de Cenários.

Neste algoritmo, os Agentes Vendedores e Compradores são vistos como “jogadores” e são estabelecidos cenários que, no fundo, são a conjugação de várias “jogadas” possíveis, resultado das acções passadas e estimativa do comportamento futuro dos agentes presentes no mercado.

As várias “jogadas” são então analisadas no contexto dos vários cenários definidos, aplicando-se um Critério de Decisão que vai suportar a decisão de definir o preço pretendido pelo agente para o período seguinte, preço esse a propor à Bolsa ou em negociações bilaterais. A cada novo período os passos do algoritmo repetem-se.

Tal como ilustrado na figura 6.3, alguns dos passos fundamentais deste algoritmo são:

- Definição dos Cenários a Analisar;
- Definição das Licitações a Analisar;
- Análise das “jogadas”;
- Aplicação de Critério de Decisão.

A definição dos cenários e das licitações a analisar corresponde, no fundo, à definição das “jogadas” a analisar. O termo “jogada” é utilizado com o intuito de descrever uma determinada situação de mercado, composta pelo cenário de estudo definido, que descreve as opções dos outros agentes presentes no mercado, e pela licitação do agente que está a usar o algoritmo. Assim, as “jogadas” serão, no fundo, a conjugação dos vários cenários de estudo com as várias licitações que o agente pretende analisar. Com a descrição do algoritmo este conceito será pormenorizado e melhor ilustrado.

Passemos então à descrição dos passos fundamentais que constituem o AAC.

6.1.3.1 Definição de “Jogadas”

Cada agente possui alguma informação sobre os demais agentes presentes no mercado, informação essa que vai aumentando com o decorrer das negociações entre os agentes, e que está contida, tal como descrito na secção 5.2.2.1, no seu Módulo de Conhecimento Individual e de Mercado.

O conhecimento que os agentes detêm permite-lhes construir um perfil, mais ou menos fiável, dos outros agentes. O perfil dos agentes é caracterizado essencialmente pelo preço limite, pretendido e capacidade de produção, no caso dos Agentes Vendedores, ou pela quantidade de energia de que necessitam, no caso dos Compradores. Com estes perfis, e tendo em conta os interesses particulares do utilizador, o agente define os cenários a analisar.

O conhecimento que os agentes detêm é fundamental para o sucesso do algoritmo, pelo que, um dos passos mais importantes no desenvolvimento futuro do MASCEM será a inclusão de técnicas de Descoberta de Conhecimento que permitam aos agentes extrair conhecimento do histórico de negociações efectuadas e da informação de mercado disponibilizada.

De notar que é habitual que, após um determinado período de confidencialidade, seja revelada variada informação acerca do mercado, relativa, por exemplo, às licitações

apresentadas em Bolsa por todos os participantes. Tal sucede, por exemplo, no mercado espanhol, sendo a informação disponibilizada pela Companhia Operadora do Mercado Espanhol [OMEL, URL].

Suponhamos que o agente que pretende recorrer ao AAC está inserido num contexto em que:

- **N** é o número de agentes presentes no mercado;
- **A** é o conjunto de todos os agentes;
- **j** é o agente que vai fazer a análise;
- **a** é um determinado agente presente no mercado, em que $a \in A \wedge a \neq j$.

O perfil de um determinado agente **a** será caracterizado pela informação relativa a:

$$\begin{cases} \text{preço_limite}_a \\ \text{preço_pretendido}_a \\ \text{en_pretendida}_a \end{cases} \quad (6.16)$$

Definição dos cenários

Mediante os perfis dos vários agentes, é possível construir um conjunto de cenários que o agente terá interesse em avaliar. Um cenário traduz uma situação de mercado em que cada agente presente no mercado propõe um determinado preço, tal como ilustrado na figura 6.4.

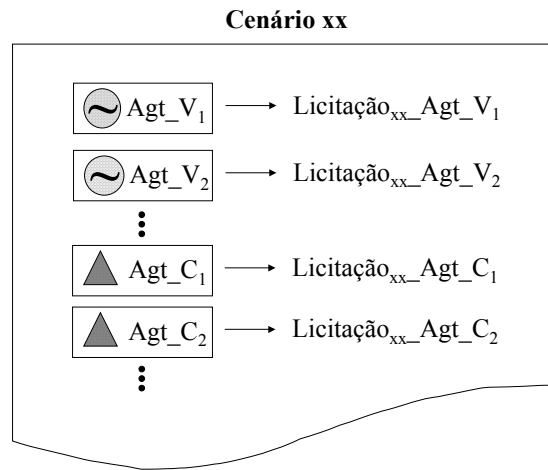


Figura 6.4: Cenário de Mercado.

Considerando que cada agente só está interessado em licitar ou propor o seu preço limite ou o seu preço pretendido, o número de cenários que é possível construir é dado por:

$$\text{num_cenários} = 2^{N-1} \quad (6.17)$$

O número de cenários a analisar poderá aumentar consideravelmente tendo em conta que o agente poderá licitar ou propor qualquer preço entre o seu limite e o valor que estipulou como pretendido, ou até mesmo ultrapassar o preço que à partida era o que pretendia obter.

Considerando-se esta hipótese, e definindo:

- **np** como a quantidade de licitações diferentes, a que correspondem preços diferentes, que se pretendem analisar para cada agente **a**;

o número de cenários a analisar, resultado das combinações que é possível fazer considerando **np** preços para cada agente, passa a ser de:

$$\text{num_cenários} = np^{N-1} \quad (6.18)$$

Definição das licitações

O agente, ao recorrer ao AAC, pretende recolher informação que suporte a sua decisão de definir o preço a propor ao mercado.

Para tal, irá analisar os vários cenários definidos, sob várias perspectivas, através da definição de um conjunto de licitações e análise dos resultados que se obtêm ao licitar cada uma delas em cada um dos cenários. Duas licitações que, à partida, o agente querera analisar são, sem dúvida, o seu preço limite e o pretendido, tendo em conta a aplicação da estratégia que escolheu. No entanto, com base nos perfis dos outros agentes, a análise de licitações que se aproximem dos preços que eles poderão propor, mas que sejam suficientemente diferentes para serem mais competitivas, será também importante.

A figura 6.5 pretende ilustrar esta ideia.

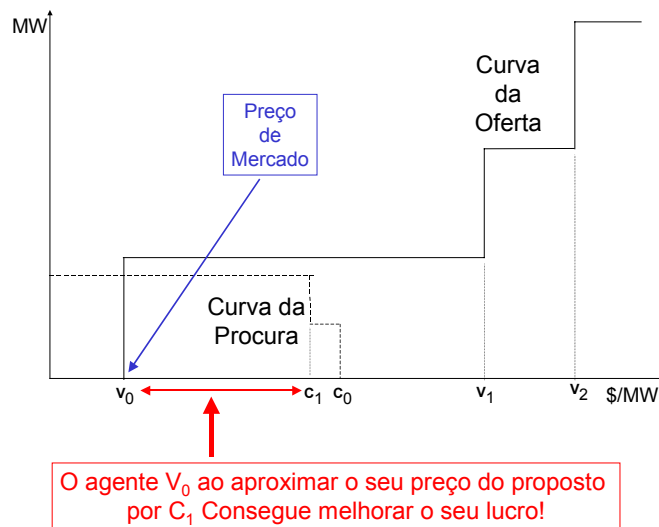


Figura 6.5: Aproximação das Licitações aos preços propostos pelos outros Agentes.

Isto é, por exemplo, no caso de o agente ser um Vendedor, a análise de licitações em que propõe um preço ligeiramente abaixo do que outros Vendedores poderão propor será importante, uma vez que lhe permitirá ser mais competitivo do que eles, ao mesmo tempo que ao propor um preço ligeiramente abaixo do que os Compradores estão interessados em obter, poderá levar a que aumente o seu leque de clientes.

Assim, tendo em conta apenas os preços que caracterizam o perfil dos outros agentes, o agente **j** pretenderá analisar as licitações:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{licitação}(\text{preço_limite}_j, \text{En_pretendida}_j) \\ \text{licitação}(\text{preço_pretendido}_j, \text{En_pretendida}_j) \\ \text{licitação}(\text{preço_limite}_a - \varepsilon, \text{En_pretendida}_j) \\ \text{licitação}(\text{preço_pretendido}_a - \varepsilon, \text{En_pretendida}_j) \end{array} \right. , \forall a \in A, a \neq j, \quad (6.19)$$

desde que se verifiquem as condições:

$$\text{preço_limite}_a - \varepsilon > \text{preço_limite}_j \wedge \text{preço_pretendido}_a - \varepsilon > \text{preço_limite}_j \quad (6.20)$$

sendo ε o incremento mais pequeno que é possível fazer tendo em conta a unidade monetária utilizada.

Se todos os valores de preços limites e pretendidos que caracterizam o perfil dos outros agentes respeitarem as condições indicadas, o número de licitações que o agente **j** estará interessado em analisar é de:

$$\text{num_licitações} = 2 \times (N - 1) + 2 \quad (6.21)$$

Cada “jogada” corresponde então a um par (licitação, cenário), pelo que o número total de “jogadas” será:

$$\text{num_jogadas} = 2^{N-1} \times (2 \times (N - 1) + 2) \quad (6.22)$$

A análise do número de licitações e “jogadas” feita até agora é bastante redutora, uma vez que apenas considera como licitações dos agentes os seus supostos preços limite e pretendido. No entanto, os agentes podem licitar qualquer valor entre esses dois preços, e mesmo preços superiores ao suposto preço pretendido, no caso dos Vendedores, ou inferiores ao pretendido, no caso dos Compradores. Nesse caso, o número de “jogadas” a analisar será de:

$$\text{num_jogadas} = np^{N-1} \times (np \times (N - 1) + 2) \quad (6.23)$$

O mercado eléctrico simulado no MASCEM encontra-se organizado, tal como já foi referido, em vários períodos de negociação. À medida que o mercado evolui, os agentes podem tomar uma de três opções: aumentar, diminuir ou manter o preço proposto no período anterior. Assim, à medida que decorre a simulação, o número de cenários a

analisar pelo AAC aumenta de forma considerável. Deste modo, após k períodos de negociação, considerando as três opções possíveis, o número de “jogadas” a analisar será de:

$$\text{num_jogadas}_k = np^{N-1} \times (np \times (N - 1) + 2) \times 3^{(k-1) \times (N-1)} \quad (6.24)$$

De notar que a quantidade de licitações de cada agente é um valor que aumenta exponencialmente. Mas será fundamental analisar todas as possibilidades? Farão umas mais sentido do que outras?

Sendo um dos principais objectivos do MASCEM o de servir como ferramenta de treino e apoio à decisão às entidades intervenientes nos Mercados Competitivos de Energia Eléctrica, é dada aos utilizadores a opção de definir que tipo de licitações pretende que sejam avaliadas. Por exemplo, pode ser um utilizador cauteloso e pessimista que esteja interessado em avaliar cenários em que os agentes estão a licitar os seus preços limite.

O utilizador terá então que definir quantos cenários pretende analisar e quais os preços de cada agente em cada cenário. Esta definição é feita com base nos preços limite e pretendidos pelos agentes, através da definição de:

$$\text{preço}_{a,k} = \lambda_k \times \text{preço_pretendido}_a + \varphi_k \times \text{preço_limite}_a \quad (6.25)$$

em que λ e φ são factores de escala que podem ser diferentes de agente para agente.

Se pretende analisar uma situação pessimista do ponto de vista dos Vendedores, o utilizador irá definir um cenário em que os Vendedores licitam o seu preço limite e os Compradores o seu preço pretendido. Assim, os valores a definir para λ e φ serão, no caso dos Vendedores, de 0 e 1, e no caso dos Compradores, de 1 e 0, respectivamente.

Se, por outro lado, o utilizador está interessado na análise do cenário mais provável, então definirá λ e φ como sendo 1 e 0, respectivamente, para todos os agentes, já que o preço pretendido é à partida o mais provável de ser licitado pelos agentes. De realçar, mais uma vez, que a qualidade da informação recolhida pelo agente, e respectiva análise, são fundamentais para o sucesso da aplicação do algoritmo.

Sendo:

- **nc** o número de cenários definido pelo utilizador;

como a cada cenário corresponde um preço por agente, o número de “jogadas” a analisar será de:

$$\text{num_jogadas} = nc \times (nc \times (N - 1) + 2) \quad (6.26)$$

Uma vez analisadas as “jogadas” definidas, simulando-se o mecanismo de mercado em vigor, é construída uma matriz de resultados, cujas linhas correspondem às licitações do agente e as colunas aos cenários. A figura 6.6 ilustra este processo.

Posteriormente, à matriz é aplicado um Critério de Decisão, através do qual o agente é capaz de seleccionar uma das licitações.

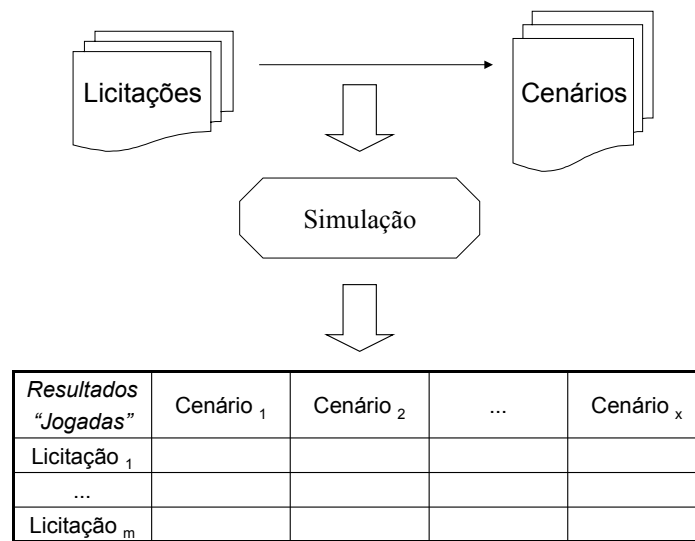


Figura 6.6: Matriz resultado da análise de "Jogadas".

6.1.3.2 Tomada de Decisão

A tomada de decisão dos agentes é feita sob incerteza, através da aplicação de um critério de decisão.

A análise das decisões dos agentes é baseada na Teoria de Jogos, particularmente em jogos de dois jogadores, em que cada jogador tenta maximizar o menor lucro possível ou minimizar os maiores gastos possíveis.

Deste modo, um Agente Vendedor, agindo à semelhança de um jogador "ofensivo", tenta maximizar o lucro mínimo, usando para tal o critério de decisão MaxiMin. Para tal, irá analisar para cada licitação qual o menor lucro que conseguirá, seleccionando em seguida aquela que lhe assegura o maior desses lucros.

Estratégias Jogador X	Estratégias Jogador Y		Lucro Mínimo de X
	1	2	
1	3	5	3
2	1	-2	-2

MaxiMin: máximo do lucro mínimo

Figura 6.7: Utilização do critério MaxiMin.

Como exemplo do funcionamento deste critério, apresenta-se na figura 6.7 a matriz de resultados de um jogo de soma zero (nos jogos de soma zero a soma dos ganhos e perdas dos dois jogadores é igual a zero), com dois jogadores, X e Y, supondo que ambos possuem duas estratégias de actuação. O jogador X, ao actuar como jogador “ofensivo”, irá aplicar o critério de decisão MaxiMin, e seleccionar a estratégia que lhe traz o maior dos menores lucros que poderá conseguir. Neste caso, irá seleccionar a estratégia 1.

Por outro lado, um Agente Comprador, agindo à semelhança de um jogador “defensivo”, selecciona a licitação que lhe retorna o mais baixo dos maiores gastos, através da aplicação do critério MiniMax. Para tal, determina para cada licitação qual o maior gasto em que poderá incorrer, seleccionando em seguida a licitação que tem associado o menor desses gastos.

Por exemplo, considerando o mesmo jogo já apresentado na figura 6.7, a figura 6.8 ilustra a situação em que actuando o Jogador Y como jogador “defensivo”, este irá aplicar o critério de decisão MiniMax, de modo a seleccionar a estratégia que lhe permite minimizar o maior dos seus gastos.

Estratégias Jogador X	Estratégias Jogador Y	
	1	2
1	3	5
2	1	-2

Maior gasto (indicando os valores 3 e 5 na linha 1)
MiniMax: mínimo do gasto máximo (indicando o valor 3)
 gasto máximo (indicando o valor 5)

Figura 6.8: Utilização do critério MiniMax.

De notar que a análise das várias jogadas feita pelos Agentes Compradores assegura que os cenários em que não seja possível garantir que comprem toda a energia de que necessitam, são penalizados relativamente a cenários em conseguem comprar toda a energia de que necessitam. Tal é importante, uma vez que, não sendo adquirida toda a energia, é natural que aos cenários corresponda um gasto menor, o que poderia induzir erradamente o agente, pensando este que se tratava de um cenário mais vantajoso.

6.1.3.3 Actualização de Cenários

Tal como já foi referido, após cada período de negociação são três as acções que cada um dos agentes pode tomar: subir, manter ou descer o preço pretendido. Assim, e tendo em conta o número de cenários, **nc**, a analisar, definido pelo utilizador, no período de negociação **k**, o número de “jogadas” é de:

$$\text{num_jogadas}_k = nc \times (nc \times (N - 1) + 2) \times 3^{(k-1) \times (N-1)} \quad (6.27)$$

No entanto, há certas acções que, em determinados contextos, será quase certo que os agentes não irão tomar. Por exemplo:

- Se um Agente Vendedor havia licitado um preço superior ao que foi estabelecido no mercado e superior ao seu preço limite, então, certamente este Agente Vendedor irá baixar o preço a propor;
- Do mesmo modo, se um Agente Comprador licitou abaixo do preço estabelecido para o mercado, ou seja, não conseguiu comprar o que pretendia, e abaixo do seu preço limite, então irá, certamente, aumentar o preço a propor, na tentativa de ser melhor sucedido no período de negociação seguinte.

A actualização dos cenários será feita com base em regras de conhecimento, semelhantes às citadas, evitando-se deste modo a análise de cenários cuja probabilidade de ocorrência é, à partida, muito reduzida, senão mesmo nula. Estas regras de conhecimento fazem parte do Módulo de Conhecimento Individual e de Mercado do agente.

Através das regras de conhecimento o número de cenários em análise mantém-se como:

$$\text{num_jogadas} = nc \times (nc \times (N - 1) + 2) \quad (6.28)$$

Sendo, as regras usadas para actualizar em cada cenário as licitações feitas pelos agentes.

De notar que, com base nos resultados obtidos através da aplicação deste algoritmo, o agente poderá avaliar as propostas de estabelecimento de Contratos Bilaterais de forma mais fundamentada, na medida em que possui já uma estimativa dos resultados previstos para a Bolsa. De facto, os resultados previsto com o auxílio do AAC permitem aos agentes melhorar o processo de negociação, nomeadamente no que diz respeito à formulação de contra-propostas.

No próximo capítulo será apresentado um exemplo de aplicação deste algoritmo, que pretende ilustrar, por um lado, o modo como funciona e, por outro lado, em que situações traz mais vantagens aos agentes.

6.2 Comparação com trabalhos relacionados

Nesta secção, de modo a comparar o trabalho por nós desenvolvido com os simuladores analisados no capítulo 4, elaborou-se a tabela 6.1, baseada na tabela 4.1 mas incluindo agora o MASCEM.

Tabela 6.1: Comparação entre o MASCEM e trabalhos relacionados.

	Agentes	Modelo de Mercado	Rede de Transporte	Procura	Comportamento Agentes
AMS	Compradores; Vendedores; Mediador	Leilão Duplo	Incluída mas Simplificada	Fixa	Adaptativos (Alg. Genéticos)
AAEPI	Compradores; Vendedores; Op. Rede Transporte	Leilão Holandês	Incluída mas Simplificada	Fixa	Estratégias de compra/venda dependentes do tempo
SEPIA	Produtores; Consumidores; Op. Rede Transporte	Contratos Bilaterais	Incluída mas Simplificada em Zonas	Variável	Aprendizagem Q-learning nos Agentes Produtores
PowerWeb	Vendedores; Op. Independente do Sistema	Bolsa (Assimétrica)	Incluída	Fixa	Comportamento simples para definir ofertas de venda
EMCAS	Produtores; Consumidores; Entidade de Transporte; Distribuidores; Op. Sistema; Reguladores	Contratos Bilaterais, Bolsa (Simétrica), Mercado de Serviços de Sistema	Incluída mas Simplificada em Zonas	----	Aprendizagem (Alg. Genéticos) e tolerância ao risco
MASCEM	Vendedores; Compradores; Op. Mercado; Op. Sistema; Comercializadores	Contratos Bilaterais, Bolsa (Assimétrica e Simétrica), Mercados Mistos	Localizações incluídas mas análise da Rede não	Variável	Estratégias dependentes do tempo e do comportam.; Alg. Análise Cenários

Podemos observar que as diferenças mais relevantes, apresentadas pelo MASCEM, relativamente aos outros trabalhos, são a inclusão de agentes que representam os Comercializadores, o tipo de mecanismos de negociação em mercados diários de electricidade que é possível simular, e as características estratégicas do comportamento dos agentes.

Assim, trata-se do único trabalho que permite incluir os Comercializadores, entidades que surgiram no âmbito da reestruturação do sector eléctrico, e que assumem um papel particularmente importante na fase de transição de um mercado monopolista para um mercado competitivo, principalmente ao nível dos consumidores domésticos, que poderão encarregar uma entidade com maior poder de mercado de negociar o fornecimento de energia eléctrica com as entidades que a vendem, mesmo numa fase em que o mercado já se encontre completamente aberto e competitivo.

O estudo de diferentes mecanismos de negociação em mercados eléctricos é uma mais valia, principalmente numa fase em que a experiência de negociação em mercados deste género é ainda pouca, tanto a nível de treino como de apoio à tomada de decisões por parte das entidades que nele têm de negociar. Particularmente relevante é o facto do MASCEM simular Mercados Mistos, tendo em conta que hoje em dia a tendência é cada

vez mais a de permitir negociações bilaterais em simultâneo com a negociação em Bolsa. Veja-se, por exemplo, o caso de Inglaterra e País de Gales.

Relativamente ao comportamento dos agentes, ainda que não seja possível eleger em qual dos trabalhos o comportamento estratégico é mais relevante, é possível verificar que as estratégias que os agentes MASCEM podem utilizar são distintas dos outros trabalhos. Uma mais valia importante que apresentam as estratégias implementadas é o facto de requererem pouco esforço computacional e pouca informação, quer em termos de informação de mercado quer de informação sobre os competidores e demais agentes nele presentes.

O Algoritmo de Análise de Cenários surge como ferramenta importante, que permitirá aos agentes ganhar vantagem face aos competidores, obtendo melhores lucros. No entanto, para que seja possível retirar todo o potencial do algoritmo é necessário que os agentes consigam recolher muita e boa informação sobre o mercado e agentes nele presentes, além de conseguirem retirar conhecimento dessa informação. O aspecto da obtenção deste conhecimento é ainda um ponto a desenvolver futuramente e será abordado no capítulo de conclusões finais desta Tese.

6.3 Conclusões

Neste capítulo descreveu-se o comportamento que podem exibir os agentes mais interventivos no processo de negociação, ou seja, os agentes que vendem e compram energia eléctrica. Nomeadamente, foi descrita a forma como se dá o processo de formulação e análise de licitações e propostas, e as estratégias que os agentes podem usar na definição dos preços e, logo na definição das suas propostas.

As estratégias implementadas dividem-se nas que são aplicáveis ao longo de um período de negociação, sendo estratégias dependentes do tempo, e nas que são aplicáveis para definição de preços entre períodos de negociação, sendo, neste caso, as estratégias implementadas, dependentes do comportamento.

O Algoritmo de Análise de Cenários foi também descrito, tendo sido realçadas as mais valias que pode trazer, mas também os aspectos que ainda é preciso melhorar e incluir no MASCEM no sentido de os agentes poderem retirar mais vantagens da sua utilização.

No próximo capítulo, as funcionalidades do MASCEM e o comportamento dos agentes serão ilustrados através da apresentação e análise de alguns exemplos.

MASCEM: Implementação e Análise Experimental

Neste capítulo aborda-se a implementação do MASCEM – Simulador de Mercados Eléctricos Competitivos, e é feita a descrição e análise experimental de alguns cenários de mercado.

A análise experimental permite, por um lado, ilustrar o comportamento dos agentes e funcionalidades do MASCEM, e, por outro lado, validar a sua utilidade como ferramenta de apoio ao estudo e análise de mercados competitivos de electricidade.

Introdução

Uma grande vantagem do MASCEM, e das ferramentas de simulação em geral, é o facto de poder servir como ferramenta de treino. No caso concreto do MASCEM, as entidades do mercado eléctrico, pouco habituadas a lidar com os novos modelos de mercado, poderão adquirir experiência sobre o funcionamento do mercado e a melhor forma de nele negociar. Neste aspecto é fundamental que o interface do sistema seja fácil de manusear, quer na definição de cenários a analisar quer na análise dos resultados, e que ilustre bem a evolução das negociações. Outra possibilidade é usar o MASCEM como ferramenta de apoio à decisão, uma vez que permite estudar o mercado e analisar decisões antes que estas sejam postas em prática, avaliando as vantagens e consequências de cada uma.

Neste capítulo começamos por descrever de que modo foi implementado o MASCEM e qual o interface disponibilizado até ao momento. De notar que neste aspecto muito há a ser feito de modo a que se torne um interface mais agradável ao utilizador, pretendendo-se ainda que possua características inteligentes e adaptativas. Tal será abordado novamente no próximo capítulo, em que se descrevem os desenvolvimentos futuros.

O estudo de vários cenários de mercado permite analisar a utilidade do simulador MASCEM sobre a perspectiva experimental, e de que modo este pode ser uma mais valia para as entidades de mercado, não só sob a perspectiva de ferramenta de treino, mas também como ferramenta de análise do comportamento do mercado, mesmo em termos da sua evolução futura.

Ainda neste capítulo, o comportamento dos agentes é ilustrado através da análise de alguns casos de estudo. Os casos de estudo que se apresentam pretendem ilustrar de forma simples o funcionamento do MASCEM e retirar algumas conclusões sobre o desempenho das estratégias implementadas.

Assim, os casos de estudo apresentados destinam-se, por um lado, a ilustrar de que modo o MASCEM pode ser importante para as entidades que participam nos mercados de energia eléctrica. Por outro lado, aproveita-se para fazer também uma análise do comportamento estratégico dos agentes, comparando as estratégias e mais valias que o seu uso pode trazer. Nesta perspectiva, ilustra-se ainda o funcionamento e a utilidade do Algoritmo de Análise de Cenários. Os casos de estudo descritos são baseados em cenários simples de pequena dimensão, de modo a, por um lado, facilitar a sua descrição e análise e a, por outro lado, ser mais simples ao leitor a compreensão dos mecanismos em que se baseia o comportamento dos agentes.

De salientar que os cenários que se podem analisar com o sistema MASCEM não estão, de maneira nenhuma, limitados a cenários simples e de pequena dimensão, podendo o sistema ser utilizado para análises de cenários muito mais complexos e de grande dimensão. Aliás, foi com base no estudo de um cenário de dimensão considerável que se fez uma análise relativa à duração das simulações, no sentido de validar a sua aplicação em tempo útil a cenários que se possam aproximar da realidade.

7.1 Implementação

O MASCEM foi implementado em linguagem Java, usando a plataforma de suporte *Open Agent Architecture* (OAA), já referida na secção 3.2.4. A linguagem de comunicação entre os agentes é o *Interagent Communication Language* (ICL), também referida na secção 3.2.2.

De momento, para além de um pequeno interface desenvolvido em Visual Basic para auxiliar o utilizador a criar e manusear cenários e a analisar resultados obtidos de forma gráfica, o interface existente baseia-se sobretudo no interface disponibilizado pela plataforma OAA. Este interface é ilustrado na figura 7.1, mostrando um caso particular com um cenário com três Agentes Vendedores, dois Agentes Compradores e um Comercializador, além do Agente Mercado, e dos Agentes Operador de Mercado e de Sistema.

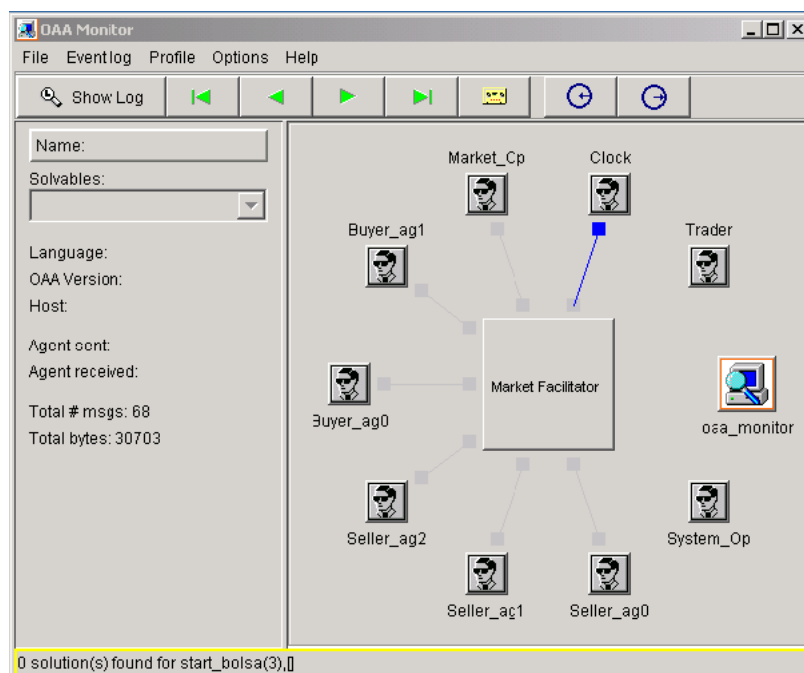


Figure 7.1: Interface OAA do MASCEM.

O Agente Mercado faz parte do suporte computacional onde o sistema está implementado e foi desenvolvido como uma extensão do Agente *Facilitator*, agente central da plataforma OAA, já descrita na secção 3.2.4.

De notar que a entidade *Clock*, responsável pela gestão temporal da simulação, foi incluída para adaptar a plataforma OAA à simulação de mercados periódicos. De modo a facilitar a troca de mensagens a sua implementação foi feita seguindo a mesma estrutura dos agentes, embora esta entidade não se possa considerar como sendo um agente.

Embora o interface fornecido pelo OAA possua características interessantes, como sejam a possibilidade de analisar a sequência e conteúdo das mensagens trocadas entre os agentes, tal como ilustrado na figura 7.2, o interface é neste momento, um aspecto pouco desenvolvido.

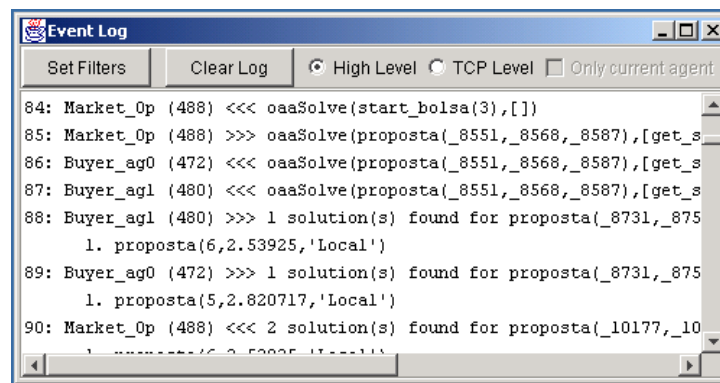


Figure 7.2: Interface OAA para visualização das mensagens trocadas entre os Agentes.

Dos desenvolvimentos a curto prazo faz parte a criação de um interface, complementar ao já fornecido pelo OAA, que permita, por um lado, um melhor manuseamento do simulador no que toca à definição dos cenários e análise de resultados, e por outro lado, a possibilidade de fazer um melhor acompanhamento à evolução da simulação e negociações entre os agentes. Para tal, a nossa intenção é a de criar um interface inteligente e adaptativo, tal como se refere no capítulo de Conclusões.

Só a título ilustrativo apresentam-se alguns dos ecrãs desenvolvidos em Visual Basic para criação e manuseamento de cenários e análise de resultados. A linguagem usada no interface é o inglês, para facilitar a divulgação científica deste trabalho.

Na figura 7.3 ilustra-se o ecrã principal que permite criar ou alterar cenários, ou executar uma simulação, com base num cenário previamente especificado.

A execução de uma simulação dá lugar ao aparecimento da interface disponibilizada pelo OAA, previamente ilustradas na figura 7.1 e 7.2, que ilustra os agente presentes no mercado a trocarem mensagens entre si.

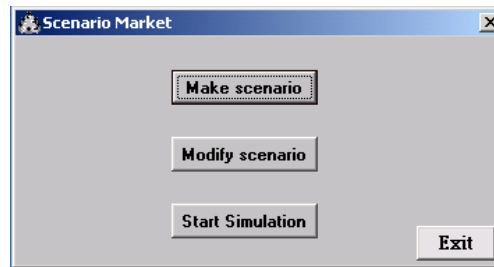


Figure 7.3: Ecrã principal para manuseamento de Cenários.

Da definição de um cenário faz parte a especificação do modelo de mercado e qual o número de Agentes Vendedores, Compradores e Comercializadores. É também necessário indicar quantos períodos de negociação irão ser simulados. Este ecrã é ilustrado na figura 7.4.

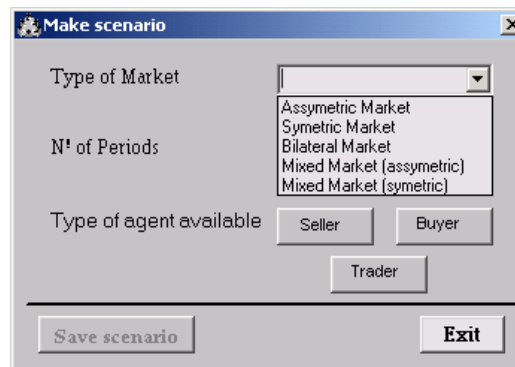


Figure 7.4: Ecrã de definição de um Cenário.

Para cada um dos tipos de agentes é, posteriormente, pedida informação. Ilustra-se, na figura 7.5, o ecrã para inserção de informação relativa aos Agentes Compradores.

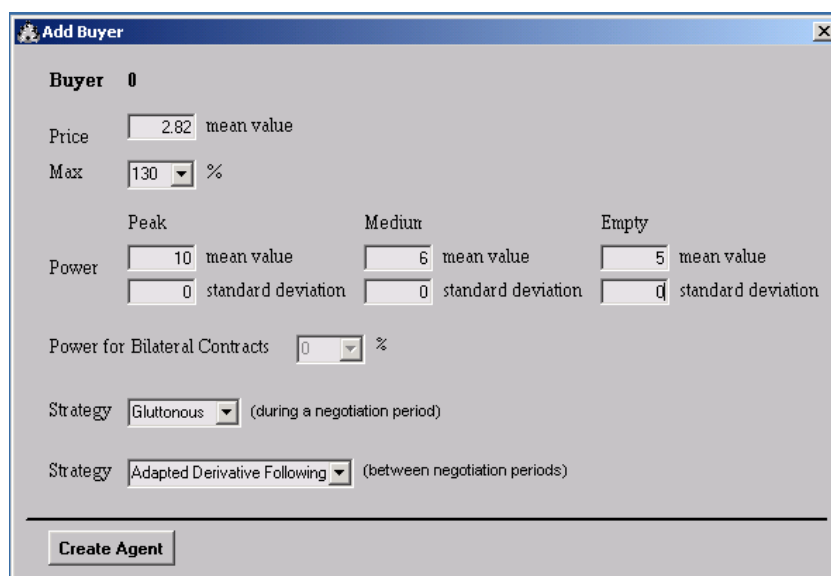


Figure 7.5: Ecrã para entrada de informação sobre um Agente Comprador.

As necessidades de cada Agente Comprador, em cada tipo de período são especificadas através de uma função de distribuição de probabilidade normal, permitindo-se deste modo oscilações nas necessidades de energia de período para período.

7.1.1 Plataforma de Comunicação

A OAA foi a plataforma seleccionada para o desenvolvimento do nosso trabalho, entre outros motivos, pelo facto de suportar e facilitar a gestão da comunicação entre agentes. Estes podem ser escritos em diferentes linguagens de programação e executar em diferentes plataformas, em ambientes distribuídos. Por outro lado, é muito simples adicionar e/ou substituir dinamicamente agentes.

O componente central da plataforma é o Agente *Facilitator*, sendo qualquer agente presente no sistema obrigado a nele efectuar o seu registo. O *Facilitator* armazena informação relativa a todos os agentes do sistema, incluindo a sua identidade e localização (na rede de comunicações), bem como as capacidades (serviços que fornece) de cada um.

Através do *Facilitator*, agentes solicitadores e fornecedores de serviços são postos em contacto. Podendo, no entanto, os agentes fazer pedidos endereçados e comunicações ponto a ponto que não passam pelo *Facilitator*.

Um aspecto interessante é o facto de ser possível desenvolver aplicações com diversos Agentes *Facilitators*. Embora, até ao momento, não tenha sido explorado, este é um aspecto a estudar a curto prazo, uma vez que traz vantagens do ponto de vista de eficiência e do ponto de vista de concepção.

Do ponto de vista de eficiência, deste modo será possível evitar sobrecarregar um único *Facilitator* com todo o tráfego de comunicações do sistema. Do ponto de vista conceptual, poderá ser usado um *Facilitator* para cada área geográfica da rede de transporte de electricidade. Neste caso, existiria na mesma um único *Facilitator* com o registo de todos os agentes do sistema, sendo criados agentes designados, por exemplo, como Operadores Regionais da Rede de Transporte, responsáveis pela análise de rede em cada uma das regiões.

7.2 Análise Experimental

Esta secção destina-se, por um lado, a ilustrar as funcionalidades do simulador e, por outro lado, a analisar as estratégias implementadas, o que permitirá, de certa forma, validar a utilidade do MASCEM.

Para tal, apresentam-se alguns exemplos baseados em cenários simples, com um pequeno número de agentes, e que foram seleccionados para facilitarem a descrição, interpretação e obtenção de conclusões, e tornarem mais simples ao leitor a compreensão dos mecanismos inerentes ao MASCEM.

7.2.1 Definição de Cenários e Análise de Resultados

No sentido de dotar o utilizador com toda a liberdade de análise cabe-lhe, ao definir os cenários a estudar através do MASCEM, caracterizar pormenorizadamente a quantidade de agentes de cada tipo que pretende ver incluído, além de especificar qual tipo de negociação e qual o horizonte temporal a simular.

Para cada agente que participa activamente no processo de negociação, Agentes Vendedores e Compradores, o utilizador definirá as características intrínsecas do agente:

- quantidade de energia a produzir, ou comprar, por período;
- preço inicial pretendido;
- preço limite do agente;
- localização do agente, na Rede de Transporte.

De notar que, na definição das necessidades de energia a comprar por cada Agente Comprador, são definidos valores de energia para períodos de ponta, cheia e vazio, que depois serão utilizados tendo em conta o período do dia a que corresponde cada período de negociação.

A quantidade de energia produzida e necessária por período pode ser definida por uma função que varia ao longo do tempo, não sendo obrigatório que o valor se mantenha fixo ao longo de toda a simulação.

Como já foi referido, o MASCEM permite simular os mercados *spot*, em que um dia é dividido em 24 períodos de negociação referentes às 24 horas do dia.

Como características estratégicas, que irão ditar o comportamento do agente ao longo do processo de negociação, o utilizador definirá, para cada agente:

- as estratégias de variação de preço ao longo de um período de negociação;
- as estratégia de variação de preço entre períodos de negociação;
- se pretende que o agente recorra, ou não, ao Algoritmo de Análise de Cenários (AAC). Caso afirmativo, terá ainda que descrever os preços a analisar por cenário, tendo em conta a equação 6.25, que aparece na secção 6.1.3.

Os resultados obtidos podem ser divididos em duas classes:

- resultados por agente: para cada agente é possível avaliar a satisfação dos seus objectivos em cada período, em termos das quantidades que conseguiu vender, ou comprar, e do lucro, ou dos gastos, resultantes;
- resultados de mercado: para cada período de negociação, se se trata de um mercado organizado em Bolsa ou Misto, os resultados dizem respeito ao preço de mercado por período e à quantidade de energia transaccionada.

O MASCEM está desenvolvido de modo a ser possível executar o modelo de forma distribuída, pelo que é possível que os agentes estejam distribuídos, sendo executados em várias máquinas diferentes. Tal pode ser um aspecto importante na análise de cenários em que a quantidade de agentes é elevada.

7.2.2 Casos de Estudo – Estratégias

O simulador de mercado pode ser usado para avaliar o comportamento estratégico dos agentes presentes no modelo.

Nesta primeira secção, os exemplos apresentados permitem retirar algumas conclusões relativamente ao desempenho das estratégias implementadas para variação de preço entre períodos de negociação e à mais valia de dotar os Agentes Compradores de comportamento estratégico.

7.2.2.1 Cenário de Monopólio

Nesta secção apresenta-se um exemplo de uma situação de monopólio por parte dos Agentes Vendedores. Como tal, neste cenário existe apenas um Agente Vendedor, enquanto que existem 2 Agentes do tipo Comprador. O objectivo é o estudo do desempenho das estratégias de definição de preço entre períodos, nos dois tipos de mercado em Bolsa, Mercado Assimétrico e Simétrico, que é possível simular. Começemos por descrever os dados do cenário a simular.

As características do Agente Vendedor são:

- Potência disponível por período: 13 kWh;
- Preço inicial proposto: 1.95 Cent/kWh;
- Preço mínimo: 1.56 Cent/kWh.

As características intrínsecas de um dos Agentes Compradores são as seguintes:

- Potência em vazio: 5 kWh;
- Potência em cheia: 6 kWh;

- Potência de ponta: 10 kWh;
- Preço inicial proposto: 2.82 Cent/kWh;
- Preço máximo: 3.67 Cent/kWh.

Para o outro Agente Comprador temos:

- Potência em vazio: 6 kWh;
- Potência em cheia: 6 kWh;
- Potência de ponta: 10 kWh;
- Preço inicial proposto: 2.53 Cent/kWh;
- Preço máximo: 3.29 Cent/kWh.

Assumiu-se que os períodos de ponta, cheia e vazio ocorrem em simultâneo para os dois Agentes Compradores.

De notar que em períodos de vazio e cheia, a energia produzida pelo Agente Vendedor excede as necessidades de energia dos Compradores. Por outro lado, em períodos de ponta, a energia produzida pelo Agente Vendedor não é suficiente para satisfazer na totalidade as necessidades de energia dos dois Compradores.

Tais características irão permitir observar o comportamento do agente, ditado pela estratégia escolhida, em situações em que não consegue vender tudo o que produz, porque a procura não é suficiente, e em situações em que tudo o que produz é vendido, e mesmo assim não chega para satisfazer toda a procura.

Por outro lado, deste modo é também possível analisar períodos em que os dois Compradores conseguem ver as suas necessidades satisfeitas e outros em que um deles não consegue comprar toda a energia de que necessita.

Os parâmetros α e β , da equação 6.15, foram definidos por forma a que os ajustes feitos ao preço, entre períodos de negociação, oscilem entre 2 e 5 %.

Começamos por analisar o Mercado Assimétrico.

Mercado Assimétrico

Neste tipo de mercado os Agentes Compradores apenas especificam as suas necessidades, estabelecendo desse modo a procura. Só os Vendedores estão habilitados a competir em Bolsa, daí que apenas o comportamento estratégico dos Vendedores seja relevante.

Iremos analisar em seguida os resultados do mercado e o comportamento do Agente Vendedor quando, num mercado Assimétrico, usa a estratégia *Composed Goal Directed* (CGD) e a estratégia *Adapted Derivative Following* (ADF), descritas na secção 6.1.2.2.

Analisando a figura 7.6, nota-se claramente que a estratégia ADF resulta em preços de mercado mais elevados. O que acontece é que, uma vez que é o único Agente Vendedor do mercado que impõe o preço, com a estratégia ADF, ao subir o preço das suas propostas vai sempre subir o preço de mercado, tendo por isso um retorno maior, e continuando deste modo a seguir a tendência, bem sucedida, de continuar a subir o preço que propõe.

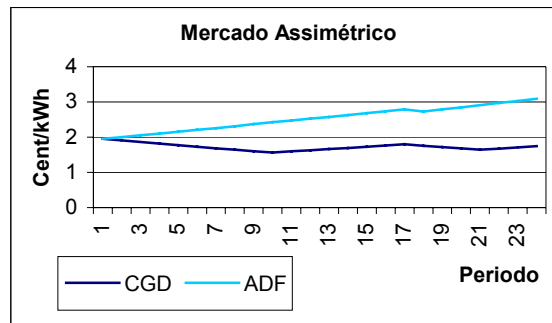


Figure 7.6: Preço do Mercado em Bolsa.

Com esta estratégia o preço apenas desce quando há transição de um período de procura superior para outro de procura inferior. Neste caso o retorno é inferior ao retorno do período anterior, não devido a baixar o preço de mercado mas devido a um decréscimo na procura, o que leva o Agente Vendedor a inverter a sua tendência, rapidamente reposta, de aumentar o preço que propõe.

Com a estratégia CGD, quando a procura não é suficiente para que o Agente Vendedor consiga vender toda a sua capacidade disponível, ao baixar o preço o Vendedor está a prejudicar os seus resultados pois por muito que baixe o preço nunca vai conseguir atingir o seu objectivo de vender tudo o que produz.

Mercado Simétrico

Neste tipo de mercado há competição por parte dos Agentes Vendedores e Compradores. Iremos começar por analisar o desempenho das duas estratégias numa situação em que os Agentes Compradores mantenham o seu preço fixo para, em seguida, analisarmos os efeitos do comportamento estratégico por parte destes agentes.

Na figura 7.7 pode ver-se que, neste caso, os preços de mercado obtidos através da estratégia ADF foram superiores aos obtidos com base na estratégia CGD.

Com a estratégia CGD não se observam grandes diferenças relativamente ao mercado Assimétrico, uma vez que neste caso o preço de mercado acaba por nem se aproximar do preço a que os Agentes Compradores estão dispostos a comprar. No entanto, com a estratégia ADF, pode-se observar o efeito limitativo dos preços propostos pelos Agentes Compradores.

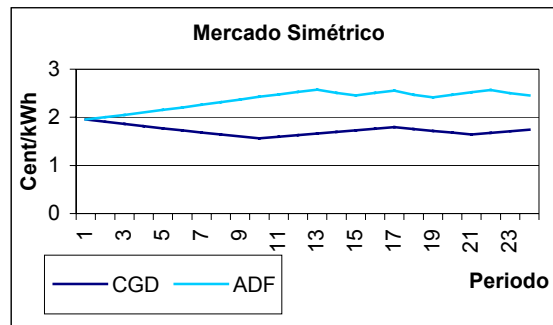


Figure 7.7: Preço de Mercado com Compradores sem comportamento estratégico.

Quando o preço proposto pelo Agente Vendedor excede o preço proposto pelo Comprador que propõe o mais baixo preço de compra, o preço de mercado passa a oscilar à volta desse valor. O que acontece é que, quando o preço proposto pelo Agente Vendedor ultrapassa o preço proposto por um dos Agentes Compradores, esse Comprador ao não conseguir comprar nada vai influenciar o retorno do Vendedor, que passa a ser inferior, fazendo com que este inverta a tendência, até aí bem sucedida, de subir o preço proposto.

Considerando agora que os Agentes Compradores recorrem ambos à mesma estratégia para definir os seus preços à medida que decorrem os períodos de negociação, pode-se observar nas figuras 7.8 e 7.9 que qualquer que seja o comportamento estratégico dos Agentes Compradores, nesta situação de monopólio por parte do Agente Vendedor, a estratégia com que este consegue obter melhores resultados é a ADF.

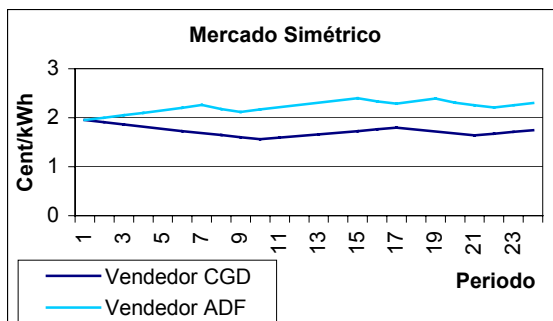


Figure 7.8: Preço de Mercado com Compradores com estratégia CGD.

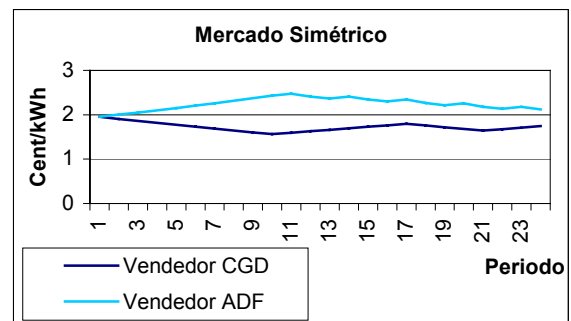


Figure 7.9: Preço de Mercado com Compradores com estratégia ADF.

O que se passa é que nos períodos de menor procura, quando esta não é sequer suficiente para que o Agente Vendedor consiga vender toda a sua capacidade disponível, com a estratégia CGD o Agente Vendedor obtém piores resultados, pois vai baixando o preço na tentativa de vender mais quando tal não é possível.

O efeito do comportamento estratégico dos Agentes Compradores faz-se sentir, na medida em que se nota um decréscimo no preço de mercado quando é usada a estratégia ADF por parte do Agente Vendedor, ou seja, quando o preço de mercado atinge valores mais elevados.

A análise do que sucede do ponto de vista dos Agentes Compradores, em termos do uso das diferentes estratégias, irá permitir explicitar melhor a razão de tal acontecer.

Quando o Agente Vendedor usa a estratégia CGD verifica-se que, independentemente do comportamento dos Agentes Compradores, o preço de mercado é sempre o mesmo, tal como ilustrado na figura 7.10.

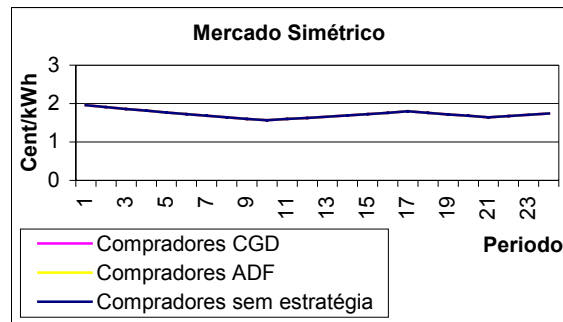


Figure 7.10: Preço de Mercado com Agente Vendedor com estratégia CGD.

O que acontece é que o preço de mercado, que coincide com o valor das propostas do Agente Vendedor, é bastante inferior ao preço a que os Compradores estão dispostos a comprar, durante todo o horizonte temporal simulado. Por um lado, ao usar a estratégia CGD, o Agente Vendedor não sobe muito o preço que propõe, pelo facto já identificado de estar a baixar o preço em períodos em que não consegue cumprir o objectivo de vender tudo o que produz por a procura não ser suficiente para tal. Por outro lado, porque os preços pretendidos pelos Agentes Compradores são elevados em relação aos valores pretendidos pelo Vendedor, como tal, as modificações feitas no sentido de baixar os preços pretendidos, apesar de ocorrerem em quase todos os períodos de negociação, excepto em alguns períodos de ponta, não o fazem baixar significativamente.

Vejamos o que se passa no caso do Agente Vendedor adoptar uma estratégia ADF. A figura 7.11 ilustra os resultados obtidos.

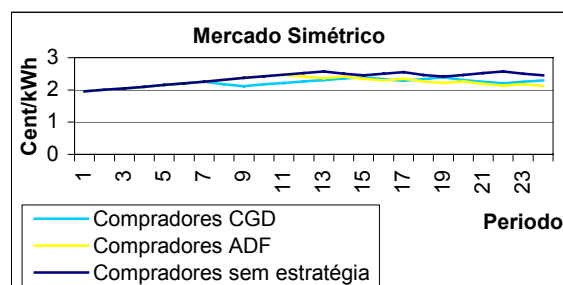


Figure 7.11: Preço de Mercado com Agente Vendedor com estratégia ADF.

Neste caso já se faz sentir o efeito do comportamento estratégico dos Agentes Compradores na definição do preço de mercado. Os preços propostos pelo Agente Vendedor atingem valores mais elevados do que na situação anterior, atingindo o patamar de preços propostos pelos Agentes Compradores, que assim conseguem limitar a sua subida.

Embora se note no gráfico ilustrado na figura 7.11 que usando qualquer tipo de estratégia os Agentes Compradores conseguem influenciar o preço de mercado, impedindo que seja superior ao obtido quando não têm qualquer tipo de comportamento estratégico, existe grande proximidade entre os resultados obtidos através dos dois tipos de estratégia desenvolvidos. No entanto, observando-se os valores médios do preço de mercado, é possível concluir que os preços são ligeiramente inferiores quando os Agentes Compradores utilizam a estratégia CGD do que quando utilizam a estratégia ADF.

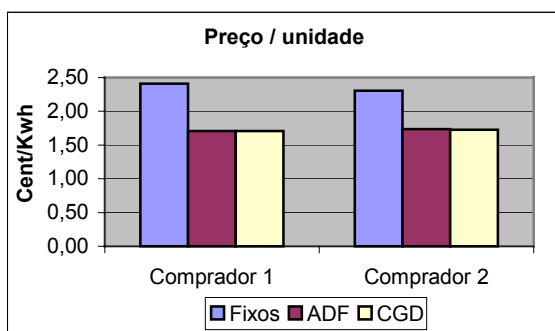


Figure 7.12: Preço de compra, por unidade, face a variações do comportamento dos Compradores.

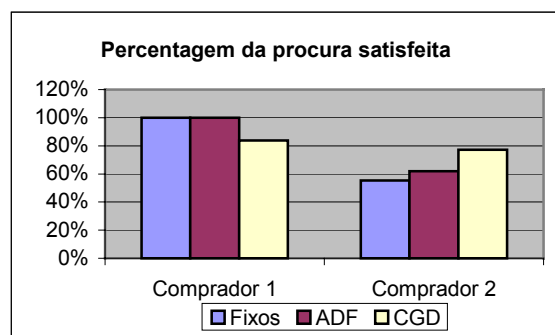


Figure 7.13: Percentagem da procura satisfeita face a variações do comportamento dos Compradores.

Por parte dos Compradores, pode-se ver que as variações nas suas propostas, tendo por base as estratégias de definição de preços, se podem traduzir não só na redução dos custos como também no aumento da percentagem de procura satisfeita, tal como é ilustrado nas figuras 7.12 e 7.13.

Conclusões

Do cenário analisado podemos retirar algumas conclusões relativamente ao desempenho das estratégias, baseadas no comportamento, para definição dos preços entre períodos de negociação.

Um aspecto importante é o facto de, dadas as suas características, a estratégia ADF conduzir a melhores resultados em situações em que existem períodos em que o agente, que está a impor o preço de mercado, por ser o único ou por ser aquele cuja oferta é mais cara de todas as ofertas de venda aceites, não consegue vender toda a energia que produz.

Do exemplo analisado pode-se também verificar que o comportamento dos Agentes Compradores é relevante, uma vez que consegue influenciar o preço de mercado, quando este se aproxima dos valores a que os Compradores estão dispostos a pagar.

7.2.2.2 Cenário de Competição entre Vendedores

Analisemos agora uma situação em que existem dois Agentes Vendedores, com as mesmas características intrínsecas, a competir entre si, mantendo-se idênticos os restantes dados do cenário mas alterando o comportamento estratégico dos agentes.

Mercado Assimétrico

A comparação dos resultados obtidos em competição e em situação de monopólio pode ser feita com base na análise dos gráficos apresentados nas figuras 7.14 e 7.15.

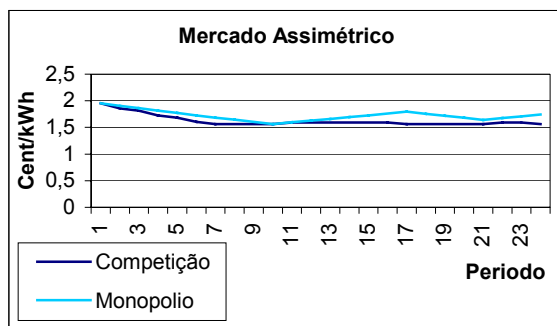


Figure 7.14: Preço de mercado com Vendedores com estratégia CGD.

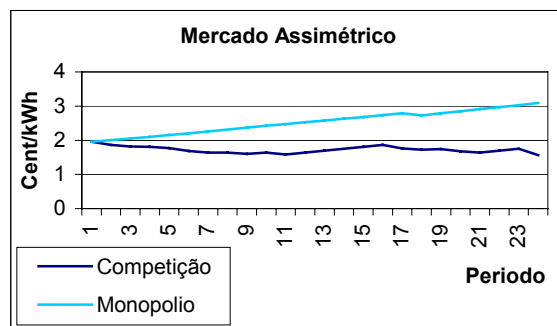


Figure 7.15: Preço de mercado com Vendedores com estratégia ADF.

Confirma-se aquilo que intuitivamente já se adivinhava: em competição o preço de mercado é inferior ao obtido em situação de monopólio. Tal diferença é particularmente mais significativa no caso dos Agentes Vendedores recorrerem à estratégia ADF. Ao ter com quem competir, a subida de preço de um Agente Vendedor que recorre à estratégia ADF, implica que quem vende no período seguinte é o outro Vendedor, o que faz com que a tendência de subir o preço proposto se inverta frequentemente, logo não chegando a atingir valores tão elevados como na situação de monopólio.

Em seguida simulou-se o mesmo tipo de mercado, ainda em situação de competição, mas agora com um dos Agentes Vendedores usando a estratégia CGD e o outro agente a estratégia ADF, mantendo-se idênticos os restantes dados de entrada.

Após algumas simulações concluiu-se que os resultados conseguidos no primeiro período influenciam o resultado final para os agentes. Tais resultados são aleatórios, uma vez que no primeiro período ambos os Vendedores vão propor o mesmo preço, sendo as suas ofertas à Bolsa tratadas por ordem de chegada, sendo que um deles não vai conseguir vender pois a procura é pouca.

Sendo assim, apresentam-se os resultados obtidos quando foi o agente que usa a estratégia CGD quem conseguiu vender no primeiro período e os resultados obtidos quando foi o agente que usa a estratégia ADF que conseguiu vender primeiro.

De qualquer modo, analisando-se o gráfico da figura 7.16, podemos concluir que o agente que usa uma estratégia CGD obtém resultados significativamente melhores que o agente que usa a estratégia ADF. A vantagem ganha pelo agente CGD deve-se ao facto de começar por propor preços mais baixos, devido ao facto, já analisado na secção anterior, de a procura nos períodos iniciais não ser suficiente para que venda tudo. O agente ADF acaba por ter alguma vantagem em ser o agente CGD o primeiro a vender, pois neste caso o agente ADF começará por diminuir o seu preço e desse modo os seus preços acabam por não se afastar muito dos preços propostos pelo outro agente.

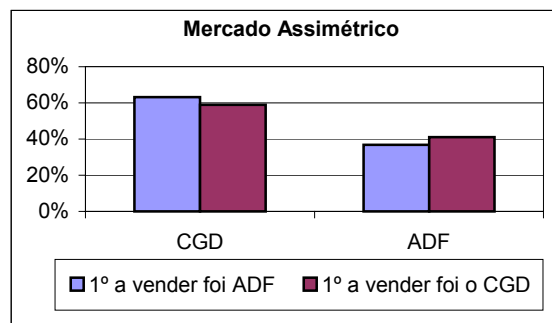


Figure 7.16: Resultados dos Agentes Vendedores.

Mercado Simétrico

Vamos começar por analisar o desempenho dos dois Agentes Vendedores, com as mesmas características intrínsecas mas estratégias diferentes, numa situação em que os Agentes Compradores não apresentam qualquer tipo de comportamento estratégico. Apresentam-se os resultados dos agentes tendo em conta as duas situações, já referidas, de analisar qual a estratégia do agente que primeiro consegue vender.

Na figura 7.17, pode-se analisar que o agente com estratégia CGD continua a ser o que consegue melhores resultados, embora se possa observar que os resultados variam com o resultado do primeiro período de negociação, uma vez que quando é o agente CGD o primeiro a vender, o agente ADF acaba por conseguir resultados muito mais próximos dos resultados do agente CGD.

Também nesta situação a vantagem resulta de que ao começar por descer o preço no primeiro período, em consequência de não ter conseguido vender nada, o agente ADF pratica preços mais próximos do outro agente, conseguindo por isso melhores resultados do que quando começa logo por vender e por isso, por subir o preço.

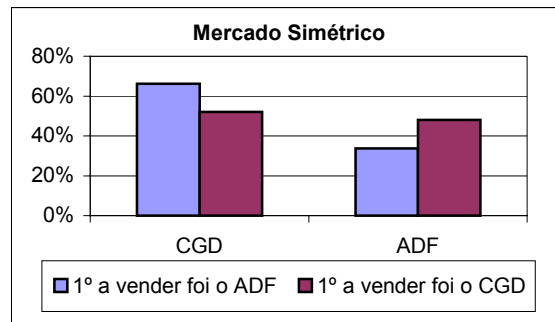


Figure 7.17: Resultados com Compradores sem comportamento estratégico.

A análise dos resultados obtidos levou-nos também a verificar que ao competirem entre si, os Agentes Vendedores fazem com que o preço de mercado não atinja valores tão elevados como em situação de monopólio, o que, neste caso, faz com que o preço de mercado não chegue a atingir, durante o horizonte temporal simulado, os valores a que os Compradores estão dispostos a comprar, pelo que, os resultados com Compradores exibindo comportamento estratégico não difere significativamente dos já apresentados.

Conclusões

Neste exemplo vemos que, em situações de competição directa, a estratégia CGD pode ser vantajosa, na medida em que se o agente não consegue vender começa por seguir a tendência de diminuir o preço, permitindo-lhe manter-se competitivo face aos seus concorrentes.

Tendo os dois Agentes Vendedores características intrínsecas exactamente iguais, além de no primeiro período de negociação ser de considerar o factor sorte, uma vez que irão propor os dois o mesmo preço, sendo aceite a proposta que primeiro chegar à Bolsa, tal factor está presente também em períodos em que ambos os agentes estão a licitar o seu preço limite, o que chega a acontecer ao fim de alguns períodos em que a procura não é suficiente para absorver toda a oferta.

Assim, achamos por bem fazer a análise do mesmo cenário, mas em que o preço pretendido por um dos Agentes Vendedores, designemos por V2 este Vendedor, sendo V1 o agente com características exactamente iguais às já referidas, é ligeiramente inferior. Por exemplo, 1 centésima de cêntimo, sendo por isso de 1.94 Cent/kWh. Verifiquemos que alterações esta pequena vantagem por parte de V2 introduz nos resultados conseguidos pelos agentes.

Mercado Assimétrico

Interessa analisar os resultados que os agentes conseguem através da utilização de cada uma das estratégias, CGD e ADF. De notar que o preço inicialmente pretendido por V2 é ligeiramente inferior ao pretendido por V1, o que, desde logo, lhe traz alguma vantagem.

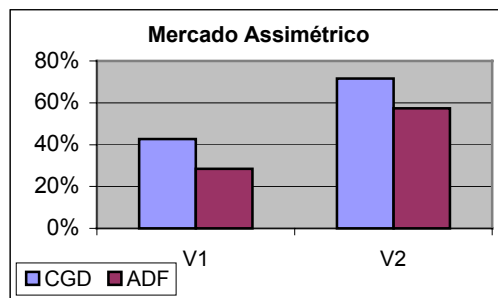


Figure 7.18: Mercado Assimétrico com Vendedores ligeiramente diferentes.

Como se mostra no gráfico da figura 7.18, qualquer dos agentes obtém melhores resultados recorrendo à estratégia CGD. Tal vem confirmar o que já havíamos concluído, em situações de competição a estratégia CGD permite ganhar vantagem face a competidores directos, com preços idênticos ou muito próximos.

Mercado Simétrico

Neste caso, os preços propostos pelos Agentes Vendedores não se chegam a aproximar dos valores aceites pelos Compradores, durante o horizonte temporal simulado, pelo que os resultados obtidos foram idênticos, independentemente do comportamento dos Agentes Compradores.

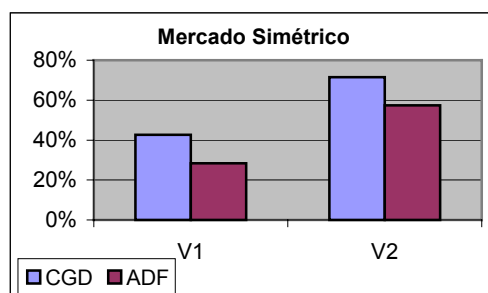


Figure 7.19: Mercado Simétrico com Vendedores ligeiramente diferentes.

Da análise da figura 7.19, podemos verificar, uma vez mais, que através do uso da estratégia CGD os agentes conseguem melhores resultados do que recorrendo à estratégia ADF, isto em situações de existirem competidores directos, com preços idênticos ou muito semelhantes.

Conclusões

Do exposto, e de outras análises feitas no decorrer deste trabalho, podemos concluir que a estratégia CGD se torna mais vantajosa em situações em que os agentes possuem competidores directos a praticar preços semelhantes, enquanto a estratégia ADF se revela vantajosa para agentes que estão a impor o preço de mercado, particularmente se não conseguem vender toda a energia que produzem e possuem margem vantajosa relativamente aos competidores.

Interessante será a possibilidade de o agente identificar a situação em que se encontra no mercado, se com competidores directos, se a impor o preço de mercado, e face a essa situação, seleccionar a estratégia mais adequada.

7.2.3 Casos de Estudo – Algoritmo Análise de Cenários

Nesta secção, além de ilustrar a aplicação do Algoritmo de Análise de Cenários (AAC), pretende-se também avaliar a vantagem que poderá trazer a sua utilização, nomeadamente identificando-se situações de mercado em que um agente poderá tirar partido do seu uso.

7.2.3.1 Cenário

Seleccionou-se um cenário em que existem 3 Agentes Vendedores e 2 Agentes Compradores. Mais uma vez se chama a atenção para o facto de os cenários seleccionados para ilustrar as funcionalidades do simulador terem sido escolhidos por forma a serem simples e de fácil descrição e análise.

O cenário é baseado no já apresentado na secção 7.2.2.1. As características intrínsecas dos agentes, são apresentadas nas tabelas 7.1 e 7.2.

Tabela 7.1: Dados dos Agentes Vendedores.

Vendedores	Preço Limite (Cent/kWh)	Preço Pretendido (Cent/kWh)	Energia disponível (kWh)
V1	1.56	1.95	13
V2	2.86	3.57	12
V3	3.15	3.93	14

Como se pode observar, existe um Vendedor, V1, que consegue praticar preços significativamente mais baixos do que os outros dois. Este Vendedor pode fazer ofertas a preço superior ao que, à partida, pretende, sem perder a sua vantagem face aos competidores.

Tabela 7.2: Dados dos Agentes Compradores.

Compradores	Preço Máximo (Cent/kWh)	Preço pretendido (Cent/kWh)	Energia ponta (kWh)	Energia cheia (kWh)	Energia vazio (kWh)
C1	3.67	2.82	5	6	10
C2	3.30	2.54	6	6	10

7.2.3.2 Exemplo

O objectivo do AAC é precisamente identificar situações, do género da descrita, em que os agentes conseguem alterar as suas pretensões, obtendo com isso melhores resultados.

Assim, através do algoritmo AAC, e desde que possua informação de mercado que o permita, o Agente V1 conseguirá melhorar os seus resultados, na medida em que os preços que pratica estão muito abaixo dos praticados pelos outros Vendedores, além de serem também inferiores ao que os Compradores estão dispostos a pagar pelas suas necessidades.

Como se pode ver na figura 7.20, a margem para subida de preço do Agente V1 é relativamente grande, pelo que este tem toda a vantagem em propor um preço mais elevado do que aquele que, à partida, pretendia.

Se o agente possui estimativas fiáveis sobre os preços pretendidos pelos outros agentes, poderá recorrer ao AAC para obter informação sobre a oferta que lhe trará melhores resultados.

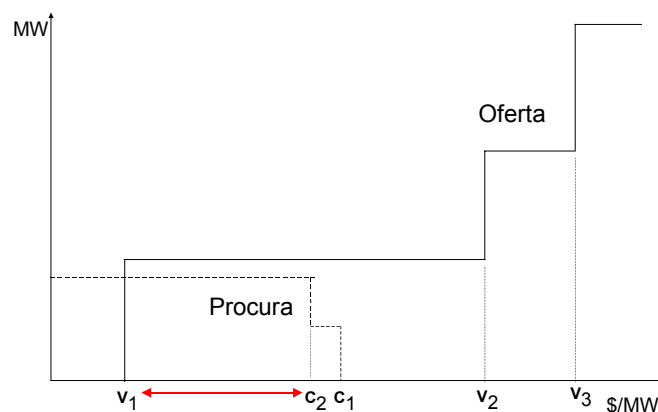


Figure 7.20: Curvas da Oferta e Procura no Mercado Simétrico.

De notar a importância da informação, vital para obter bons resultados com este algoritmo. Por isso, um dos próximos desenvolvimentos será a inclusão de mecanismos de análise e descoberta de conhecimento, que permita aos agentes retirarem informação dos dados que vão armazenando à medida que decorrem as negociações e que é disponibilizada informação de mercado.

Comecemos por analisar o que se passa a nível de Mercado Assimétrico.

Mercado Assimétrico

Neste tipo de mercado, apenas estão em jogo as licitações dos Vendedores, já que os Compradores especificam unicamente as suas necessidades de energia.

Se o Agente V1 possui informação bastante fiável relativamente aos outros agentes, poderá aproximar o preço pretendido do valor pretendido por V2, sem deixar de ter vantagem sobre ele e conseguindo assim melhores resultados.

Supondo que o utilizador especificou que os cenários a analisar seriam:

- Cenário 1: λ (factor associado ao preço pretendido) e φ (factor associado ao preço limite) iguais a 0 e 1, respectivamente, no caso dos Vendedores e iguais a 1 e 0, respectivamente, no caso dos Compradores, ou seja, trata-se de um cenário pessimista, do ponto de vista dos Vendedores;
- Cenário 2: λ e φ iguais a 1 e 0, respectivamente, para todos os agentes, ou seja, trata-se do cenário mais provável.

Tendo em conta que neste tipo de mercado os Compradores não licitam, as licitações que o agente irá analisar dizem respeito, além do seu preço limite e pretendido, às que se aproximam dos preços limite e pretendidos pelos outros Agentes Vendedores.

Na tabela 7.3 podem ver-se os resultados, em termos do lucro obtido em relação à simulação do cenário descrito sem que nenhum agente recorra ao AAC.

Tabela 7.3: Mercado Assimétrico: Resultados relativamente ao lucro obtido por V1 quando não recorre ao AAC.

	Variação no lucro de V1
Só V1 usa AAC	25 %
Todos os Vendedores usam AAC	3 %
Todos excepto V1 usam AAC	- 6 %

Como se pode verificar, o aumento é mais significativo quando apenas V1 recorre ao AAC, já que os restantes agentes irão manter inalteradas as suas licitações. Tal faz todo o sentido, na medida em que o Agente V1 ao usar o AAC vai concluir que pode fazer licitações mais elevadas na medida em que os seus competidores praticam preços mais elevados.

Quando os outros Agentes Vendedores também recorrem ao AAC, os resultados de V1 também melhoram, mas não tão significativamente. Embora não consigam licitar abaixo dos preços praticados por V1, já que os seus limites são mais elevados, os outros Agentes Vendedores ao recorrerem ao AAC começam logo por licitar próximo dos seus valores limite. Nomeadamente, o Agente V2, que é aquele com preços mais baixos de entre V2 e V3, consegue melhorar os seus resultados, na medida em que as suas licitações se aproximam do seu preço limite, conseguindo em alguns períodos de negociação melhores resultados que V1, dado o excesso de optimismo deste na sua análise de cenários e evolução dos preços praticados pelos outros agentes.

Também é notório que V1 piora os seus resultados se os outros agentes usarem o AAC e ele não. Neste caso, os outros agentes ao recorrerem ao AAC vão desde logo praticar os

seus preços limite. Por um lado, o Agente V2 apercebe-se que existe um competidor mais forte, pelo que em períodos em que a procura não é suficiente para que mais do que um agente consiga vender, licita o seu preço limite para não arriscar. Em períodos em que mais do que um agente consegue vender, V2 licita um preço que se aproxima do limite de V3, de modo a não arriscar que este possa ultrapassá-lo. Por outro lado, V3 apercebe-se que é o menos competitivo do mercado, pelo que não lhe vale a pena estar a licitar valores elevados, mantendo-se as suas licitações no seu preço limite. Os resultados de V1 são piores, pois este agente não aumenta o preço que propõe, uma vez que desconhece a sua margem relativamente aos preços praticados por V2 e V3. Por outro lado, ao praticarem preços próximos, ou mesmo idênticos, aos seus preços limite, V2 e V3 contribuem para que, em alguns períodos, o preço de mercado esteja mais limitado.

Mercado Simétrico

Mantendo os mesmo cenários em análise, além das licitações que se aproximam dos preços limite e pretendido pelos Agentes Vendedores, V1 irá também analisar licitações que se aproximam dos preços pretendidos pelos Compradores. Uma vez que os preços pretendidos pelos Compradores são inferiores aos praticados pelos Agentes V2 e V3, tal como foi ilustrado na figura 7.20, a margem de aumento das licitações de V1 no Mercado Simétrico é inferior à do Mercado Assimétrico.

Assim, embora a variação no lucro do Agente V1 siga a mesma tendência da obtida no estudo do Mercado Assimétrico, os seus resultados não são tão bons, tal como se pode verificar na tabela 7.4.

Tabela 7.4: Mercado Simétrico: Resultados relativamente ao lucro obtido por V1 quando não recorre ao AAC.

	Variação no lucro de V1
Só V1 usa AAC	12 %
Todos os agentes usam AAC	- 5 %
Todos excepto V1 usam AAC	- 13 %

Conclusões

De salientar que, a nível de utilização deste algoritmo, os agentes que dele conseguem tirar partido são os que possuem margem para alteração de preços. Ou seja, no caso dos Agentes Vendedores, todos aqueles que, por existirem agentes a praticar preços mais elevados, podem licitar acima do seu preço limite, sem com isso correr o risco de estar a perder quota de mercado.

É claro que o sucesso na aplicação deste algoritmo depende também do tipo de cenários que o utilizador especifica como importantes para análise, e, fundamentalmente,

da qualidade da informação que os agentes possuem. Tal aspecto será abordado no capítulo de Conclusões desta Tese.

7.2.4 Casos de Estudo – Duração das Simulações

Como em qualquer outro simulador, o tempo de execução de uma simulação é um factor chave para a sua utilidade. Tratando-se o MASCEM de um simulador baseado em agentes que comunicam entre si, é necessário assegurar que as mensagens trocadas entre os agentes não vão provocar sobrecarga nas comunicações, prejudicando desse modo o desempenho do simulador.

Sendo este um aspecto bastante pertinente, entendemos por bem dedicar-lhe esta secção, em que se apresentam alguns números baseados no estudo de um cenário com um número de agentes considerável.

Para retirar alguns conclusões mais concretas, fez-se o estudo de um cenário contendo cerca de 40 agentes, a negociar em Mercados em Bolsa, Contratos Bilaterais e Mercados Mistos.

De notar, no entanto, que dos testes realizados, apesar da sobrecarga nas comunicações em simulações de Mercados Mistos ou em Contratos Bilaterais ser grande, o tempo que dura a simulação não impede que o simulador possa ser usado em ocasiões próximas do instante de tomada de decisão.

Por exemplo, usando um computador pessoal com processador Pentium 4 a 1500 MHz e com 256 MB de RAM, a simulação de um cenário com 30 Agentes Vendedores, 10 Agentes Compradores e 1 Agente Comercializador, para além dos Agentes Mercado, Operador de Sistema e Operador de Mercado, a negociar num Mercado Misto durante um dia, demorou cerca de 37 minutos, tendo levado cada período de negociação cerca de 1 minuto e 30 segundos. A simulação do mesmo cenário durante um dia num mercado organizado em Bolsa demora apenas 15 minutos.

Das análises efectuadas, concluímos que a duração das simulações não é, à partida, um factor limitativo. Por um lado porque sendo o MASCEM um simulador que se destina a servir como ferramenta de treino e suporte às decisões dos utilizadores, o seu uso será certamente feito com antecedência e não como ferramenta em “tempo real”, a usar no momento em que é necessário tomar a decisão de enviar licitação à Bolsa ou de responder a um Contrato Bilateral. Por outro lado, é possível fazer a análise dos resultados dos períodos já simulados sem que para tal seja necessário que a simulação de todo o horizonte temporal, inicialmente especificado, esteja concluída. Tal característica permite que o utilizador, após simulados os períodos de negociação iniciais, por exemplo da simulação de um dia de negociações, possa analisar os resultados obtidos até aí e tomar

as suas decisões sem que se veja obrigado a ter que esperar pelo termo de toda a simulação.

Refira-se, ainda, que o equipamento usado, um mero computador pessoal já desactualizado, nos leva a concluir que em plataformas convencionais mais actuais os tempos serão menores. De qualquer modo poderíamos sempre considerar plataformas com multiprocessamento ou a distribuição dos agentes por várias máquinas, o que tornaria os tempos de simulação praticamente insignificantes.

7.3 Conclusões

Neste capítulo começamos por abordar a implementação do sistema MASCEM. Tal implementação assenta na plataforma de suporte *Open Agent Architecture*.

O interface do sistema, embora bastante incompleto e sendo um dos desenvolvimentos futuros a curto prazo, é também apresentado.

Foi também feita a análise de alguns cenários simples e de pequena dimensão, cujo objectivo foi acima de tudo ilustrar o funcionamento do sistema. Aproveitaram-se os exemplos para analisar o desempenho e diferenças entre as estratégias, e o modo como os agentes podem tirar mais partido da utilização de cada uma. Relativamente às estratégias de definição de preços entre períodos de negociação, verificou-se que, à partida, a estratégia *Composed Goal Directed* permite obter melhores resultados em situações em que um agente está em competição directa com agentes que praticam preços semelhantes. Por outro lado, a estratégia *Adapted Derivative Following* revelou-se mais vantajosa para os agentes que estão a impor o preço de mercado com alguma margem relativamente aos preços praticados pelos demais agentes.

Relativamente ao Algoritmo de Análise de Cenários, foi também apresentado um pequeno exemplo, com o intuito de melhor ilustrar o seu funcionamento e a forma como é possível tirar partido da sua utilização.

Foi feito, ainda, um pequeno estudo relativo à duração das simulações.

Com este capítulo concluiu-se a apresentação do trabalho desenvolvido, passando-se em seguida a apresentar as conclusões globais desta Tese.

Conclusões

Neste último capítulo apresentam-se a síntese e as conclusões do trabalho desenvolvido, realçando as suas contribuições científicas. São também apresentadas as limitações e perspectivas de desenvolvimento futuro.

8.1 Síntese e Conclusão do Trabalho Desenvolvido

O objectivo geral deste trabalho foi a aplicação de Sistemas Multi-Agente a Mercados Competitivos, baseando-se o mesmo, fundamentalmente, no desenvolvimento de protocolos e estratégias de negociação, bem como na análise de cenários para apoio à tomada de decisões.

De facto, as recentes e crescentes modificações no sector eléctrico tornam os Mercados de Electricidade um caso de estudo actual e muito interessante, na medida em que o desenvolvimento de ferramentas de análise que permitam avaliar a evolução do seu comportamento face à dinâmica das suas constantes transformações, é, à partida, por si só uma mais valia para tais mercados.

Foi este o caso de estudo por nós seleccionado, tendo sido especificado um Sistema Multi-Agente que serviu de suporte ao desenvolvimento de um simulador, o MASCEM—Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets, destinado sobretudo ao estudo das relações comerciais no âmbito dos Mercados Competitivos de Electricidade. Assim, especificou-se, desenvolveu-se e implementou-se um Sistema Multi-Agente que permite estudar vários modelos de mercados *spot* de electricidade.

Foram especificados os seguintes agentes:

- Agente Mercado, é o agente coordenador do mercado, que conhece as identidades e capacidades de todos os outros agentes presentes no mercado;
- Agente Vendedor, representa as entidades que vendem electricidade, tais como as entidades detentoras de unidades de produção de electricidade;
- Agente Comprador, representa as entidades que compram electricidade;
- Agente Operador de Sistema. Este agente é o responsável pelas redes de transporte. De momento as suas capacidades são limitadas, no entanto é um agente fundamental para a futura integração de algoritmos de análise de trânsito de potências e restrições técnicas nas redes eléctricas, permitindo a extensão do modelo de modo a contemplar aspectos técnicos relacionados com a operacionalidade do sistema eléctrico;
- Agente Operador de Mercado, representa o responsável pelo funcionamento da Bolsa;
- Agente Comercializador, representa as entidades com capacidade para comprar e vender energia eléctrica, mas que não são detentoras de unidades de produção de electricidade. Este agente permite incluir no modelo um tipo de

entidade que surgiu no contexto da reestruturação do Mercado de Electricidade. Este é um aspecto a salientar, na medida em que não é usual encontrar este tipo de agentes em outras ferramentas multi-agente de estudo de Mercados de Electricidade.

Os modelos de mercado suportados pelo sistema são o Modelo em Bolsa, que inclui o mecanismo de mercado Assimétrico e de mercado Simétrico, o Modelo de Contratos Bilaterais e o Modelo Misto. Esta é também uma das mais valias do nosso sistema, na medida em que permite às entidades do sector estudar, comparar e treinar o modo de actuação em diferentes modelos de mercado. Esta característica assume particular relevância, uma vez que a reestruturação dos mercados é recente, não sendo ainda consensual o modelo de mercado que melhor permite atingir os objectivos dessa reestruturação. Para cada tipo de modelo de mercado que é possível estudar, foram especificados os protocolos de negociação entre os agentes envolvidos.

O comportamento dos Agentes Vendedores e Compradores é importante, na medida em que são estes os principais intervenientes no processo de negociação. Tal comportamento assenta nos objectivos do agente, nas suas características intrínsecas, que estão relacionadas com o tipo de unidade produtora de electricidade, no caso dos Agentes Vendedores, ou que estão relacionadas com as características das suas cargas, no caso dos Agentes Compradores, bem como nas estratégias de definição de preços e na análise de cenários.

Os mercados *spot* encontram-se divididos em 24 períodos de negociação, referentes às 24 horas do dia seguinte, pelo que os agentes são dotados de estratégias para definição de preços entre e durante períodos de negociação. Assim, foram definidas estratégias dependentes do tempo, para definição de preços durante um período de negociação, e estratégias dependentes do comportamento, para definição de preços entre períodos de negociação. As estratégias foram definidas para Agentes Compradores e Vendedores.

A utilização de estratégias de definição de preços por parte dos Agentes Compradores é outra das mais valias do nosso sistema. Na verdade, faz todo o sentido dotar os Agentes Compradores de comportamento estratégico, na medida em que, por um lado, os compradores de electricidade passaram a ter um papel interventivo na maioria dos modelos de mercado, e por outro lado, porque não é usual encontrar este tipo de comportamento em plataformas similares dedicadas ao estudo dos mercados *spot* de electricidade.

As estratégias desenvolvidas para definição de preços entre períodos de negociação foram a *Composed Goal Directed* e a *Adpated Derivative Following*. Estas estratégias fazem uma análise dos resultados obtidos pelo agente nos períodos de negociação anteriores, tendo em conta os seus objectivos e comportamento. A análise de alguns exemplos permitiu associar o melhor desempenho de cada uma das estratégias a determinadas

situações de mercado. No capítulo 7 pudemos mostrar que a estratégia *Composed Goal Directed* permite alcançar melhores resultados quando existem competidores directos no mercado, a praticar preços muito semelhantes. Enquanto que, a estratégia *Adapted Derivative Following* revela melhor desempenho em situações em que é o próprio agente quem está a impor o preço de mercado, praticando preços mais competitivos que os restantes agentes.

Os agentes vão recolhendo informação sobre o seu desempenho e sobre o mercado, à medida que as negociações vão evoluindo. A análise dessa informação pode ser uma mais valia para a tomada de decisão dos agentes. Foi definido um Algoritmo de Análise de Cenários que, com base na informação recolhida pelo agente, permite definir cenários e analisá-los, estabelecendo as opções que o agente pode tomar. Os resultados dessa análise são então avaliados através de critérios de decisão baseados em Teoria de Jogos. No capítulo 7 mostramos que os agentes com a capacidade de Análise de Cenários com recurso a algoritmos de Teoria de Jogos apresentam um desempenho superior. Os agentes que mais podem beneficiar deste tipo de algoritmo são aqueles que praticam preços mais baixos, na medida em que poderão tirar partido da constatação dos preços praticados pelos outros agentes para subir as suas propostas, mantendo-se competitivos mas conseguindo melhorar o lucro.

O sistema proposto e implementado permite, portanto, estudar vários modelos de mercados *spot* de electricidade através de um simulador onde interagem vários agentes, dotados de comportamento baseado em estratégias dinâmicas e análise de cenários, estabelecendo contratos de compra e venda de energia eléctrica.

Do ponto de vista das entidades que compram e vendem energia eléctrica, a utilização do MASCEM pode trazer vantagens a vários níveis:

- familiarização com diferentes modelos de mercado;
- análise da evolução futura do mercado;
- estudo de diferentes estratégias de mercado;
- estudo de diferentes cenários: diferentes procuras, diferentes comportamentos dos seus competidores e demais agentes, diferentes estratégias de actuação, etc.

Estas vantagens podem traduzir-se em redução de custos quer por parte das entidades com unidades produtoras de electricidade quer por parte dos compradores, ao permitir-lhes estudar a sua forma de actuar no mercado e ajustar as suas estratégias de modo a conseguirem melhores resultados.

O MASCEM permite também que façam a gestão dos seus geradores e cargas. Por exemplo, as entidades com unidades produtoras de electricidade podem analisar o

comportamento futuro do mercado e podem concluir que não é vantajoso colocar em funcionamento todos os seus geradores, podendo à partida, e dependendo do tipo de geradores, deixá-los desligados durante um ou mais dias.

Por outro lado, os compradores podem também ver os seus gastos reduzidos na medida em que através da análise do mercado e dos preços previstos para cada período do dia seguinte, podem utilizar a elasticidade das suas cargas para as deslocar para períodos em que os preços de energia eléctrica sejam mais baixos, de modo a gastarem menos.

As entidades responsáveis pela definição do modelo e regulamentos que regem o mercado eléctrico podem também recorrer ao MASCEM para analisar o comportamento e evolução futura do mercado para cada modelo, bem como estudar cenários de modo a identificar situações de poder de mercado.

De salientar que, à parte alguns aspectos específicos, nomeadamente no que toca às características particulares de produção e distribuição de energia eléctrica, que naturalmente implicam a presença de alguns agentes e procedimentos específicos ao domínio dos sistemas eléctricos, muitas das características realçadas são relevantes e aplicáveis a qualquer tipo de mercado.

Outro aspecto a realçar é o facto de o sistema especificado e desenvolvido poder servir ainda de ponto de partida ao desenvolvimento de uma ferramenta de Comércio Electrónico para transacção de electricidade. Para o efeito, algumas modificações terão que ser feitas, nomeadamente no sentido de que os agentes representem melhor as preferências dos utilizadores associados, usando, por exemplo, uma função de utilidade mais abrangente, que considere outros critérios de negociação para além do preço.

8.2 Limitações e Desenvolvimento Futuro

São vários os desenvolvimentos que se pretendem efectuar no futuro. Estes desenvolvimentos prendem-se sobretudo com as limitações do sistema e a possibilidade de o estender a outros domínios. Relativamente a alguns aspectos a desenvolver o modelo foi já especificado, prevendo e facilitando a sua inclusão futura.

Apesar de já incluir o Agente Operador de Sistema e as comunicações entre agentes no sentido de ele ser informado de todas as transacções que os outros agentes pretendem efectuar, uma das limitações do MASCEM, como ferramenta orientada ao estudo dos Mercados Eléctricos, é a falta de algoritmos de gestão do sistema eléctrico em si. Por exemplo, no que diz respeito a algoritmos de análise de trânsito de potências na rede, que seriam disponibilizados ao Agente Operador de Sistema, para que este possa na realidade

validar as transacções comerciais que os Agentes Vendedores e Compradores tentam estabelecer. Toda a informação necessária a que essa validação possa ser feita, nomeadamente os locais de injeção e absorção de energia na rede, e a respectiva quantidade, são já enviadas ao Agente Operador de Sistema, pelo que é apenas necessário que este disponha do diagrama completo da rede e de algoritmos adequados à análise do trânsito de potências. A inclusão desta funcionalidade irá permitir realizar estudos bastante interessantes, tais como a análise e detecção de monopólios locais e situações de poder de mercado, por parte de algumas entidades, que possam surgir associadas a esses monopólios. Neste campo está previsto recorrer à possibilidade, ainda não utilizada, de usar vários *Facilitators*, permitida pela plataforma Open Agent Architecture. Desta forma o Agente Mercado coordenaria os vários *Facilitators*, cada um associado a uma área de rede específica. Por exemplo, no contexto do Mercado Ibérico esta sub-divisão faria todo o sentido, considerando dois *Facilitators*, um associado à região Portuguesa e outro associado à região Espanhola. No âmbito do grupo de I&D em que este trabalho se insere, o grupo GECAD – Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão, estão já a ser feitas algumas tentativas no sentido de verificar a possibilidade de integrar com o MASCEM ferramentas como o *PowerWorld Simulator* [PowerWorld, URL], que permite simular o funcionamento de redes de transporte de energia eléctrica [Gonçalves, 2003].

No sentido de tornar o MASCEM uma ferramenta mais abrangente no domínio dos Mercados de Electricidade, um dos desenvolvimentos a considerar será ainda a inclusão de outro tipo de mercados de transacção de energia eléctrica, que não apenas o mercado *spot*. Por exemplo, faz todo o sentido que a ferramenta permita simular também os mercados de ajuste e de derivados.

Um aspecto importante a melhorar, relativamente à negociação entre os agentes, será a consideração de múltiplos atributos. Neste momento as negociações fazem-se com base no atributo preço. Outros atributos importantes a considerar são, por exemplo, a qualidade de serviço do fornecedor de energia, a satisfação com o agente em compromissos anteriores, ou ainda a prestação de serviços de valor acrescentado. Para tal, cada agente possuirá uma função de utilidade em que a cada atributo é dado um peso de acordo com as preferências do agente. Neste sentido, a informação recolhida pelos agentes contempla já aspectos como a satisfação do agente relativamente a compromissos anteriores com outros agentes, tal como especificado na secção 5.2.2.

Relacionado com a melhoria do processo de negociação em si, está também a possibilidade de os agentes recorrerem a argumentação. Tal pode trazer vantagens no que diz respeito, por exemplo, à angariação de clientes por parte de um Agente Comercializador. Aliás, este aspecto está também já previsto, na medida em que o protocolo de estabelecimento de contratos entre Agentes Compradores e Agente Comercializador já inclui campos destinados a que o Agente Comercializador possa

exercer argumentação, quer no estabelecimento quer na renovação de contratos. Tal foi abordado na secção 5.2.3.

Relativamente às estratégias dinâmicas que ditam o comportamento dos agentes no estabelecimento de preços durante e entre períodos de negociação, muito mais pode ser desenvolvido. De facto, não só as estratégias podem ser melhoradas como outras estratégias diferentes poderão ser incluídas.

No que diz respeito ao melhoramento das estratégias já desenvolvidas, um primeiro passo pode ser dado no sentido de permitir ao agente utilizar em cada momento a estratégia que achar mais adequada face à condição do mercado, sem ter que usar a mesma estratégia durante todo o horizonte de negociações. Já foi feita alguma análise ao desempenho das estratégias de definição de preços entre períodos de negociação, tendo sido possível verificar que, à partida, a estratégia *Composed Goal Directed* irá fornecer melhores resultados em situações em que um agente está em competição directa com agentes que praticam preços semelhantes, enquanto que a estratégia *Adapted Derivative Following* irá beneficiar aqueles agentes que estão a impor o preço de mercado com alguma margem relativamente aos preços praticados pelos restantes agentes. Logo, a possibilidade de o agente detectar qual a sua posição no mercado e, face a essa situação, utilizar uma ou outra estratégia será uma mais valia para o sistema. Por outro lado, o desenvolvimento de outras estratégias, nomeadamente baseadas em aprendizagem, iria também tornar o sistema mais completo e realista.

O Algoritmo de Análise de Cenários, apresentado na secção 6.1.3, apesar de promissor, depende da quantidade, qualidade e tratamento da informação recolhida pelo agente. Neste sentido seria interessante incluir técnicas de Descoberta de Conhecimento, disponíveis em ferramentas de *Data Mining*, capazes de gerar novo conhecimento a partir da informação recolhida pelos agentes. O *Data Mining* é um dos passos do processo de Descoberta de Conhecimento em informação e diz respeito à aplicação de algoritmos específicos, para a descoberta de padrões e criação de modelos de dados. A aplicação destes algoritmos tem por objectivo procurar relações interessantes, não triviais, implícitas e previamente desconhecidas. Assim, será possível que os agentes retirem novo conhecimento da informação recolhida ao longo das suas negociações, utilizando-a para, por exemplo, refinar o perfil dos outros agentes. Mas, para além de poder ser útil ao Algoritmo de Análise de Cenários, o conhecimento obtido poderá também servir de suporte ao desenvolvimento de novas estratégias de actuação no mercado.

A utilização de ferramentas de simulação em geral, depende muito da qualidade do interface das mesmas. O mesmo se aplica ao MASCEM. Sendo neste momento o seu interface bastante limitado, baseado quase exclusivamente no interface fornecido pela plataforma Open Agent Architecture. Este é, sem dúvida, um aspecto importante a considerar, para que o MASCEM possa ser utilizado por entidades do sector eléctrico.

Prevemos o seu desenvolvimento de modo a ser um interface amigável e de fácil manuseamento. O interface não deve ser visto apenas como tendo um aspecto gráfico atraente, devendo seguir as tendências dos interfaces mais evoluídos, interfaces inteligentes e adaptativos e interfaces de iniciativa mista. Relativamente à adaptação, prevê-se que o interface tenha a capacidade de adaptar-se automaticamente ao utilizador, por exemplo, se este preferir visualizar certos tipos de gráficos esses deverão ser exibidos. O interface também deve distinguir se estamos na presença de utilizadores iniciados ou especializados, a fundamentação das sugestões poderá ser diferente em cada caso. Também se deverá ter em atenção a adaptação à situação. Por exemplo, não é a mesma coisa estarmos a negociar num horário de vazio ou num horário de ponta. Quem toma a iniciativa na interação tanto poderá ser o sistema como o utilizador, devendo, por isso, ser usado um interface que permita iniciativa mista.

No sentido de validar todo o trabalho desenvolvido, será interessante simular um cenário de mercado baseado em informação real. Na Internet a Companhia Operadora do Mercado Espanhol [OMEL, URL] disponibiliza, após um certo período de confidencialidade, bastante informação relativamente a propostas feitas no passado, pelo que iremos começar por analisar essa informação no sentido de estudar um cenário de mercado “real”.

Finalmente, pretende-se aplicar e explorar as ideias propostas nesta Tese em outros contextos. Neste sentido, e no âmbito do Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão (GECAD), foi elaborado e proposto um projecto, o projecto “Agents & Markets”, em que se pretende aplicar o trabalho desenvolvido e exposto neste trabalho, bem como explorar algumas das ideias enunciadas. O projecto “Agents & Markets” visa criar uma ferramenta abrangente para análise de Mercados, que inclua: Simulação baseada em Agentes; Modelização do Comportamento dos Consumidores; Análise de Mercados Electrónicos; Análise de diferentes Mecanismos de Negociação; Comportamento Estratégico dos Intervenientes; Aprendizagem Automática e Data Mining; e Modelação do comportamento dos outros intervenientes com base em Teoria de Jogos. O Comércio Electrónico e os Mercados de Energia Eléctrica serão os domínios de aplicação deste projecto.

Este trabalho, apesar das várias limitações já enunciadas, permitiu dar um contributo significativo na área dos Sistemas Multi-Agente aplicados ao estudo de mercados competitivos, em particular, dos Mercados Competitivos de Electricidade. Tal é sustentado pelo impacto científico conseguido pelo MASCEM e comprovado pelo conjunto de publicações efectuadas no decorrer deste trabalho.

Assim, na área da Inteligência Artificial, para além de publicações em conferências internacionais, o MASCEM foi ainda seleccionado como um dos seis trabalhos que melhor ilustravam a aplicação de agentes aos mercados, pela revista de Inteligência Artificial do

IEEE, a IEEE Intelligent Systems [Praça, et al., 2003b]. Na área dos Sistemas Eléctricos de Energia, e para além da aceitação a nível de conferências nacionais e internacionais, o trabalho que descrevia o MASCEM foi também seleccionado de entre os 102 trabalhos apresentados na conferência Intelligent Systems Applications to Power Systems, como um dos doze trabalhos a ser publicado no Engineering Intelligent Systems Journal [Praça et al., 2004b]. Também na área da Simulação são várias as conferências internacionais em que o trabalho foi aceite, tendo sido ainda publicado no International Journal of Modelling and Simulation [Praça et al., 2004a].

As entidades do sector eléctrico enfrentam alguns dos desafios que surgiram com a reestruturação do sector eléctrico. Estando este processo ainda em progressão, novas questões e desafios vão surgindo, havendo a necessidade de dar novos contributos no sentido de se desenvolverem ferramentas de apoio à decisão, suficientemente evoluídas e completas, que permitam lidar com a complexidade dos Mercados Competitivos de Electricidade. Em nossa opinião, o MASCEM, que assenta na tecnologia dos Sistemas Multi-Agente, demonstrou potencialidades de vir a constituir o núcleo de uma ferramenta de apoio à decisão que suporte os vários intervenientes dos futuros Mercados de Electricidade. Há, ainda, muito trabalho a fazer, tal como foi referido neste capítulo, mas o trabalho associado à presente Tese de Doutoramento terá, certamente, dado alguns passos significativos.

Referências

- [Azevedo, 2003a] – Filipe Azevedo. *Apoio à Decisão para o Estabelecimento de Contratos no Mercado Competitivo da Electricidade*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [Azevedo, 2003b] – Filipe Azevedo. *Decision-Support tool for the establishment of contracts in the Electricity Market*. IEEE Bologna Power Tech 2003, Bolonha, Itália, 23-26 de Junho, 2003.
- [Bunn e Bower, 2000] – Derek Bunn e John Bower. *Model-based comparisons of pool and bilateral markets for electricity*. Energy Journal, 21(3), pp.1-29, 2000.
- [Bunn e Day, 2001] – Derek Bunn e Christopher Day. *Divestiture of generation assets in the electricity pool of England and Wales: A computational approach to analyzing market power*. Journal of Regulatory Economics, 19(2), pp.123-141, 2001.
- [Bunn e Oliveira, 2001] – Derek Bunn e Fernando Oliveira. *Agent-based Simulation – An Application to the New Electricity Trading Arrangements of England and Wales*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 5(5), pp.493-503, 2001.
- [Bunn e Oliveira, 2003] – Derek Bunn e Fernando Oliveira. *Evaluating Individual Market Power in Electricity Markets via Agent-Based Simulation*. 2003. Disponível em <http://phd.london.edu/foliveira/publications.html>.
- [Cliff, 1997] – Dave Cliff. *Minimal Intelligence Agents for Bargaining Behaviors in Market-Based Environments*. Technical Report, University of Sussex, 1997. (disponível em: <http://www.hpl.hp.com/techreports/97/HPL-97-01.html>).
- [Cockburn e Jennings, 1996] – D. Cockburn e Nicholas Jennings. *ARCHON: A Distributed Artificial Intelligence System for Industrial Applications*. Em: Foundations of Distributed Artificial Intelligence, Gregory O'Hare e Nicholas Jennings, John Wiley & Sons, pp.319-344, 1996.
- [Concordia, 1999] – Charles Concordia. *Electric Power Systems: Past, Present, and Future*. IEEE Power Engineering Review, 19(2), pp. 7-8, 1999.

- [Conejo, 1999] A. J. Conejo. *Evolucion Historica y Regulación del Sector Eléctrico Español*. 6^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Lisboa, 7-9 de Julho, 1999.
- [Contreras et al., 2001] – Javier Contreras, A. Losi e M. Russo. *A JAVA / MATLAB Simulator for Power Exchange Markets*. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on Power Industry Computer Applications (PICA 2001), Sydney, Australia, 20-24 May, 2001.
- [Contreras et al., 2002] – Javier Contreras, A. J. Conejo e M. G. Munoz. *Power Engineering Lab: Electricity Market Simulator*. IEEE Transactions on Power Systems, 17(2), pp. 223-228, 2002.
- [Corera et al., 1996] – Jose Manuel Corera, Inaki Laresgoiti e Nicholas Jennings. *Using ARCHON, Part 2: Electricity Transportation Management*. IEEE Expert, 11(6), pp. 71-79, 1996.
- [Cristie e Wangenstein, 1998a] – Richard Cristie e Ivar Wangenstein. *The Energy Market in Norway and Sweden: Introduction*. IEEE Power Engineering Review, 18(2), pp. 44-45, 1998.
- [Cristie e Wangenstein, 1998b] – Richard Cristie e Ivar Wangenstein. *The Energy Market in Norway and Sweden: The Spot and the Futures Markets*. IEEE Power Engineering Review, 18(3), pp. 55-56, 1998.
- [Dash et al., 2003] – Rajdeep Dash, David Parkes e Nicholas Jennings. *Computational-Mechanism Design: A Call to Arms*. IEEE Intelligent Systems – Special issue on Agents and Markets, 18(6), pp. 40 – 47, 2003.
- [Davis, 1980] – R. Davis. *Report on the Workshop on Distributed Artificial Intelligence*. SIGART Newsletter, 73, pp.42-52, 1980.
- [Davis e Smith, 1983] – R. Davis e R. Smith. *Negotiation as a Metaphor for Distributed Problem Solving*. Artificial Intelligence, 20(1), pp. 63-109, 1994.
- [Durfee e Rosenschein, 1994] – Edmund Durfee e Jeffrey Rosenschein. *Distributed Problem Solving and Multi-Agent Systems: Comparisons and Examples*. Proceedings of the 13th International Distributed Artificial Intelligence Workshop, pp. 94-104, 1994.
- [Faratin et al., 1998] – Peyman Faratin, Carlos Sierra e Nicholas Jennings. *Negotiation Decision Functions for Autonomous Agents*. International Journal of Robotics and Autonomous Systems, 24(3-4), pp. 159-182, 1998.
- [Fatima et al., 2001] – S. Shaheen Fatima, Michael Wooldridge e Nicholas Jennings. *Optimal Negotiation Strategies for Agents with Incomplete Information*. 8th

- International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages, Seattle, E.U.A., pp.53-68, 2001.
- [Fatima et al., 2002] - S. Shaheen Fatima, Michael Wooldridge e Nicholas Jennings. *Multi-issue Negotiation Under Time Constraints*. 1st International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Bolonha, Itália, pp. 143-150, 2002.
- [Ferber, 1999] – Jacques Ferber. *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Addison-Wesley, 1999.
- [Franklin e Graesser, 1996] – Stan Franklin e Art Graesser. *Is it an Agent or Just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents*. Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages, publicado em Intelligent Agents III, Springer Verlag, pp. 21-35, 1997. (disponível em <http://www.msci.memphis.edu/~franklin/AgentProg.html>)
- [Gilbert e Troitzsch, 1999] – Nigel Gilbert e Klaus Troitzsch. *Simulation for the Social Scientist*. Open University Press, 1999.
- [Gode e Sunder, 1993] – Dan Gode e Shyam Sunder. *Allocative Efficiency of Marktes with Zero-Intelligence Traders: Market as a partial substitute for individual rationality*. Journal of Political Economy, 101(1), Fevereiro, pp.119-137, 1993.
- [Gonçalves, 2003] - Manuel João Gonçalves e Zita Vale. *Evaluation of Transmission Congestion Impact in Market Power*. IEEE Bologna Power Tech 2003, Bolonha, Itália, Junho, 2003.
- [Greenwald e Kephart, 1999] – Amy Greenwald e Jeffrey Kephart. *Shopbots and Pricebots*. Proceedings of Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1, pp.506-511, 1999.
- [Gruber, 1993] – Tomas Gruber. *A Translation Approach to Portable Ontology Specifications*. Knowledge Acquisition, 5(2), pp. 199-220, 1993.
- [Harp et al., 2000] – Steven Harp, Sergio Brignone, Bruce Wollenberg e Tariq Samad. *SEPIA: A Simulator for Electric Power Industry Agents*. IEEE Control Systems, pp.53-69, 2000.
- [Jennings e Wooldridge, 1995] – Nicholas Jennings e Michael Wooldridge. *Applying Agent Technology*. Applied Artificial Intelligence: An International Journal, Taylor & Francis London, 9(4), pp. 351-361, 1995.
- [Jennings et al., 1996] – Nicholas Jennings, Jose Manuel Corera, Inaki Laresgoiti, E. H. Mamdani, Fabien Perriolat, Paul Skarek e Laszlo Zsolt Varga. *Using ARCHON to develop real-world DAI applications, Part 1*. IEEE Expert, 11(6), pp. 64-70, 1996.

- [Jennings et. al., 1998a] – Nicholas Jennings, Katia Sycara e Michael Wooldridge. *A Roadmap of Agent Research and Development*. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 1, Kluwer Academic Publishers, pp. 7-38, 1998. (disponível em <http://www.cs.cmu.edu/~sycara>)
- [Jennings et al., 1998b] – Nicholas Jennings, Simon Parsons, Pablo Noriega e Carlos Sierra. *On Argumentation-Based Negotiation*. International Workshop on Multi-Agent Systems, Boston, E.U.A., 1998.
- [Jennings, 2001] – Nicholas Jennings. *An Agent-based Approach for Building Complex Software Systems*. Communications of the ACM, 44(4), pp. 35-41, Abril 2001.
- [Jennings et al., 2001] – Nicholas Jennings, Peyman Faratin, Alessio Lomuscio, Simon Parsons, Carlos Sierra e Michael Wooldridge. *Automated Negotiation: Prospects, Methods and Challenges*. International Journal of Group Decision and Negotiation, 10(2), pp.199-215, 2001.
- [Joskow, 2001] – Paul Joskow. *California's Electricity Crisis*. Oxford Review of Economic Policy, 17(3), pp.365-388, 2001. Disponível em: http://econ-www.mit.edu/faculty/index.htm?prof_id=pjoskow.
- [Joskow, 2003] – Paul Joskow. *The Difficult Transition to Competitive Electricity Markets in the U.S.* Conferência “Electricity Deregulation: Where from here?”, 2003. Disponível em: http://econ-www.mit.edu/faculty/index.htm?prof_id=pjoskow.
- [Joskow, 2004] – Paul Joskow. *Wholesale Power Markets in the United States*. European Forum on Electricity Reforms (SESSA), Cambridge, England, Julho, 2004. Disponível em: http://econ-www.mit.edu/faculty/index.htm?prof_id=pjoskow.
- [Karunatilake e Jennings, 2004] – Nishan Karunatilake e Nicholas Jennings. *Is it worth arguing?*. Proceedings of the 3rd International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems , New York , E.U.A., pp. 1064-1071, 2004.
- [Kearns e Ortiz, 2003] – Michael Kearns e Luis Ortiz. *The Penn-Lehman Automated Trading Project*. IEEE Intelligent Systems – Special issue on Agents and Markets, 18(6), pp. 22 – 31, 2003.
- [Kephart et al., 1998] – Jeffrey Kephart, James E. Hanson, David W. Levine, Benjamin N. Grosz, Jakka Sairamesh, Richard B. Segal e Steve R. White. *Dynamics of an information filtering economy*. Proceedings of The Second International Workshop on Cooperative Information Agents, Paris, Julho 1998. (disponível em : <http://www.research.ibm.com/infoecon/paper10.html>)
- [Kephart et al., 2000] – Jeffrey Kephart, James Hanson e Amy Greenwald. *Dynamic Pricing by Software Agents*. Computer Networks - Special Issue on Trends and

- Research in Electronic Commerce, Elsevier, 32(6), pp.731-752, 2000. Disponível em: <http://www.cs.brown.edu/people/amygreen/>.
- [Klein et al., 2003] – Makr Klein, Peyman Faratin, Hiroki Sayama e Yaneer Bar-Yam. *Protocols for Negotiating Complex Contracts*. IEEE Intelligent Systems – Special issue on Agents and Markets, 18(6), pp. 32 – 38, 2003.
- [Labrou e Finin, 1997] – Yannis Labrou e Tim Finin. *Semantics and Conversations for an Agent Communication Language*. Readings in Agents, editado por Michael Huhns e Munindar Singh, Morgan Kaufmann Publishers, pp. 235-242, 1997.
- [Law e Kelton,] – Averill Law e David Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill, Inc., 1991, ISBN 0071008039.
- [Lomuscio et al., 2003] – Alessio Lomuscio, Michael Wooldridge e Nicholas Jennings. *A Classification Scheme for Negotiation in Electronic Commerce*. International Journal of Group Decision and Negotiation, 12(1), pp. 31-56, 2003.
- [Maes, 1991] – Pattie Maes. *The Agent Network Architecture (ANA)*. SIGART Bulletin, 2(4), pp. 115-120, 1991.
- [Matos et al., 1998] – Noyda Matos, Carlos Sierra e Nicholas Jennings. *Determining Successful Negotiation Strategies: An evolutionary Approach*. 3rd International Conference on Multi-Agent Systems, Paris, França, pp.182-189, 1998.
- [MIBEL, 2002] – *Modelo de Organização do Mercado Ibérico de Electricidade*. Março de 2002. Disponível em: www.erse.pt.
- [Morris, 2001] – Joan Morris DiMicco. *A Simulation-based Approach to Dynamic Pricing*. Master thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2001. (disponível em: <http://web.media.mit.edu/~joanie/>).
- [Morris et al., 2003] – Joan Morris DiMicco, Amy Greenwald e Pattie Maes. *Learning Curve: A Simulation-based Approach to Dynamic Pricing*. Electronic Commerce Research: Special Issue on Aspects of Internet Agent-based E-Business Systems. Kluwer Academic Publishers, 3(3-4), pp. 245-276, 2003. (disponível: <http://web.media.mit.edu/~joanie/>).
- [Mount et al., 2001] – Timothy Mount, William Schulze, Robert Thomas e Ray Zimmerman. *Testing the Performance of Uniform Price and Discriminative Price Auctions*. Apresentado na Rutger's Center for Research in Regulated Industries 14th annual Western Conference: Advanced Workshop in Regulation and Competition, California, E.U.A., 2001.
- [NETA, 2000] – *A high-level explanation of the New Electricity Trading Arrangements*. Disponível em www.ofgem.gov.uk.

- [Neumann e Morgenstern, 1944] – John Von Neumann e Oskar Morgenstern. *The Theory of Games and Economic Behaviour*. Princeton University Press, 1944.
- [Nicolaisen et al., 2001] – James Nicolaisen, Valentin Petrov e Leigh Tesfatsion. *Market Power and Efficiency in a Computational Electricity Market with Discriminatory Double-Auction Pricing*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 5(5), pp.504-523, 2001.
- [Nord Pool report, 2003] – Nord Pool ASA Annual Report 2003. Disponível em www.nordpool.no.
- [Novais, 2003] – Paulo Novais. *Teoria dos Processos de Pré-Negociação em Ambientes de Comércio Electrónico*. Tese de Doutoramento. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2003.
- [Nwana, 1996] – Hyacinth Nwana. *Software Agents: An Overview*. Knowledge Engineering Review, 11(3), pp. 1-40, 1996.
- [OFGEM Press Release, 2001] - OFGEM Press Release – *Neta 'Go Live' date confirmed by trade and industry secretary*, 27 de Março de 2001. Disponível em www.ofgem.gov.uk.
- [O'Hare e Jennings, 1996] – Gregory O'Hare e Nicholas Jennings. *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. John Wiley & Sons, 1996.
- [Pereira, 2003] – Adelino Pereira. *Despacho dos Serviços de Sistema no Mercado Competitivo da Energia Eléctrica*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [Philipson e Willis, 1999] – Lorrin Philipson e H. Lee Willis. *Understanding Electric Utilities and De-Regulation*. Marcel Dekker, Inc., 1999.
- [Praça, et al., 2001a] - Isabel Praça, Carlos Ramos e Zita Vale. *Multi-Agent Simulation of Electricity Markets*. 2nd Workshop on Agent Based Simulation, Passau, Alemanha, pp. 89-94, 2001.
- [Praça, et al., 2001b] - Isabel Praça, Carlos Ramos e Zita Vale. *Competitive Electricity Markets: Simulation to improve Decision Making*. 2001-IEEE Porto, Power Tech, Porto, Portugal, vol.1, 2001.
- [Praça, et al., 2002] - Isabel Praça, Carlos Ramos, Zita Vale e Manuel Cordeiro. *Agent Strategies in Multi-Period Negotiations for Electricity Markets*. Second IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA'2002), Málaga, Espanha, pp. 411-416, 2002.
- [Praça, et al., 2003a] - Isabel Praça, Carlos Ramos, Zita Vale e Manuel Cordeiro. *Intelligent Agents for Negotiation and Game-based Decision Support in Electricity*

- Markets*. Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP 2003), Lemnos, Grécia, 2003.
- [Praça, et al., 2003b] - Isabel Praça, Carlos Ramos, Zita Vale e Manuel Cordeiro. *MASCEM: A Multiagent System That Simulates Competitive Electricity Markets*. IEEE Intelligent Systems – Special issue on Agents and Markets, 18(6), pp. 54 – 60, 2003.
- [Praça et al., 2004a] - Isabel Praça, Carlos Ramos, Zita Vale e Manuel Cordeiro. *Intelligent Agents for the Simulation of Competitive Electricity Markets*. International Journal of Modelling and Simulation, 24(2), pp. 73-79 , 2004.
- [Praça et al., 2004b] - Isabel Praça, Carlos Ramos, Zita Vale e Manuel Cordeiro. *Intelligent Agents for Negotiation and Game-based Decision Support in Electricity Markets*. Selecionado para publicação num Special Issue do Engineering Intelligent Systems Journal, a editar brevemente.
- [Rahwan et al., 2003] – Iyad Rahwan, Sarvapali Ramchurn, Nicholas Jennings, Peter McBurney, Simon Parsons e Liz Sonenberg. *Argumentation-based Negotiation*. The Knowledge Engineering Review 18 (4). Disponível em www.ecs.soton.ac.uk/~nrj/.
- [Rao e Georgeff, 1995] – Anand Rao e Michael Georgeff. *BDI Agents: From Theory to Practice*. First International Conference on Multi-Agent Systems, San Francisco, E.U.A., 1995.
- [Reticular Systems, 1999] – Reticular Systems, Inc. *Using Intelligent Agents to Implement an Electronic Auction for Buying and Selling Electric Power*. 1999. Disponível em: [http:// www.agentbuilder.com/Documentation/EPRI/index.html](http://www.agentbuilder.com/Documentation/EPRI/index.html).
- [Rosenschein e Zlotkin, 1994] – Jeffrey Rosenschein e Gilad Zlotkin. *Rules of Encounter: Designing Conventions for Automated Negotiation Among Computers*. MIT Press, 1994.
- [Sandholm e Lesser, 1995] – Thomas Sandholm e V. Lesser. *Issues in Automated Negotiation and Electronic Commerce: Extending the Contract Net Protocol*. Proceedings of the International Conference on Multiagent Systems (ICMAS 95), San Francisco, E.U.A., pp.328-335, 1995.
- [Shahidehpour et al., 2002] – Mohammad Shahidehpour, Hatim Yamin e Zuyi Li. *Market Operation in Electricity Power Systems: Forecasting, Scheduling and Risk Management*. John Wiley & Sons, 2002.
- [Sheblé, 1999] – Gerald Sheblé. *Computational Auction Mechanisms for Restructured Power Industry Operation*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [Smith, 1980] – Reid Smith. *The Contract Net Protocol*. IEEE Transactions on Computers, 29(12), pp.1104-1113, 1980.

- [Sousa e Ramos, 1999] – Paulo Sousa e Carlos Ramos. *A Distributed Architecture and Negotiation Protocol for Scheduling Manufacturing Orders*. Journal of Intelligent Manufacturing – special issue on Agent Based Manufacturing, 9(2), Chapman & Hall, pp.107-112, 1999.
- [Stoft, 2002] – Steven Stoft. *Power System Economics: Designing Markets for Electricity*. IEEE – Wiley Press, 2002.
- [Sycara, 1990] – Katia Sycara. *Negotiation Planning: An AI Approach*. European Journal of Operational Research, 46, pp. 216-234, 1990.
- [Tesauro e Das, 2001] – Gerald Tesauro e Rajarshi Das. *High-performance Bidding Agents for the Continuous Double Auction*. Third Conference on Electronic Commerce, pp.206-209, 2001.
- [Turban et al., 2004] – Efraim Turban, Jay E. Aronson, Ting-Peng Liang. *Decision Support Systems and Intelligent Systems, 7th Edition*. Prentice Hall, 2004. ISBN 0130461067.
- [Vale, 2003] – Zita Vale. *Mercados de Energia*. Publicação pedagógica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2003.
- [Viamonte et al., 2004a] - Maria João Viamonte, Carlos Ramos, José Cardoso, Fátima Rodrigues. *Simulating the Behaviour of Electronic MarketPlaces With an Agent-Based Approach*. Em Proceedings IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence, Pequim, China, pp 553-557, 2004.
- [Viamonte et al. 2004b] Maria João Viamonte, Carlos Ramos, José Cardoso, Fátima Rodrigues. *ISEM: A Multi-Agent Simulator For Testing Agent Market Strategies*. Pré-aceite para publicação em IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C - Special Issue on Game-theoric Analysis and Stochastics Simulation of Negotiation Agents.
- [Vickrey, 1961] – William Vickrey. *Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders*. Journal of Finance, 16, pp. 8-37, 1961.
- [Walsh et al., 2002] – William Walsh, Rajarshi Das, Gerald Tesauro e Jeffrey Kephart. *Analyzing Complex Strategic Interactions in Multi-Agent Systems*. Game Theoretic and Decision Theoretic Agents Workshop, American Association for Artificial Intelligence, pp.109-118, 2002. (em <http://www.research.ibm.com/infoecon/paper10.html>)
- [Wellman et al., 2003] – Michael Wellman, Shih-Fen Cheng, Daniel Reeves e Kevin Lochner. *Trading Agents Competing: Performance, Progress, and Market Effectiveness*. IEEE Intelligent Systems – Special issue on Agents and Markets, 18(6), pp. 48 – 53, 2003.

-
- [Wooldridge, 1999] - Michael Wooldridge. *Intelligent Agents*. Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence, editado por Gerhard Weiss, The MIT Press, pp. 27-77, 1999.
- [Wooldridge e Jennings, 1995] - Michael Wooldridge e Nicholas Jennings. *Intelligent Agents: Theory and Practice*. The Knowledge Engineering Review 10(2), pp.115-152, 1995. (disponível em <http://www.csc.liv.ac.uk/~mjw/pubs/>)
- [Wurman et al., 1998] – Peter R. Wurman, Michael P. Wellman e William E. Walsh. *The Michigan Internet AuctionBot: A Configurable Auction Server for Human and Software Agents*. Proceedings of the Second International Conference on Autonomous Agents, ACM Press, pp.301-308, 1998.
- [Yarom et al., 2003] – Itai Yarom, Claudia Goldman e Jeffrey Rosenschein. *The Role of Middle Agents in Electronic Commerce*. IEEE Intelligent Systems – Special issue on Agents and Markets, 18(6), pp. 15 – 21, 2003.
- [Ygge et al., 1996] – Fredrik Ygge, Rune Gustavsson e Hans Ackkermans. *HOMEBOTS: Intelligent Agents for Decentralized Load Management*. Proceedings Distribution Automation & Demand Side Management, Viena, Austria, pp.597-610, 1996.
- [Ygge et al., 1999] – Fredrik Ygge, Hans Ackkermans, Arne Andersson, Marko Krejic e Erik Boertjes. *The HOMEBOTS System and Field Test: A Multi-Commodity Market for Predictive Power Load Management*. Proceedings Fourth International Conference on The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents (PAAM'99), Londres, Reino Unido, 1999. Disponível em: <http://www.enersearch.se/~ygge/>.

Referências URL

- [AAEPI, URL] – Auction Agents for the Electric Power Industry. <http://www.agentbuilder.com/Documentation/EPRI/index.html>.
- [AESC, URL] – Alternative Energy Systems Consultants. <http://www.aesc-inc.com/>.
- [AgentBuilder, URL] – AgentBuilder. <http://www.agentbuilder.com/>.
- [Agorics, URL] – <http://www.agorics.com/auctions/>.
- [Argonne-DIS, URL] - <http://www.dis.anl.gov/>.
- [CNE, URL] – Comisión Nacional de Energía. <http://www.cne.es/>.
- [Contreras, URL] - <http://www.uclm.es/area/gsee/JavierC/javiere.htm>.
- [EMG, URL] – Energy Markets Group – London Business School. http://www.london.edu/ds/Decision_Technology_/Energy_Markets_Group/energy_markets_group.html.
- [EPRI, URL] – Electric Power Research Institute. <http://www.epri.com/>.
- [ERSE, URL] – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos. <http://www.erse.pt/>.
- [FIPA, URL] – FIPA: Foundation for Intelligent Physical Agents. <http://www.fipa.org/>.
- [Fishmarket, URL] –Fishmarket Project. <http://www.iiia.csic.es/Projects/fishmarket/>.
- [Honeywell, URL] – Honeywell Technology Center. <http://www.honeywell.com/>.
- [JATLite, URL] – Java Agent Template, Lite. <http://java.stanford.edu/>. Acesso ao software em: <ftp://samantha.stanford.edu/JATLite/>.
- [KIF, URL] – KIF: The Knowledge Interchange Format. <http://logic.stanford.edu/kif/>.
- [KQML, URL] – KQML: The Knowledge Query and Manipulation Language. <http://www.cs.umbc.edu/kqml/>.
- [MAGNET, URL] – Intelligent Agents for Electronic Commerce – The Multi-Agent Negotiation Testbed (MAGNET). <http://www.cs.umn.edu/research/airvl/magnet/>.
- [Minnesota, URL] – University of Minnesota. <http://www.umn.edu/>.
- [Mozart, URL] – The Mozart Programming System. <http://www.mozart-oz.org/>.

- [OAA, URL] – The Open Agent Architecture. <http://www.ai.sri.com/~oaa/>.
- [OFGEM, URL] – The Office of Gas and Electricity Markets. <http://www.ofgem.gov.uk/>.
- [OMEL, URL] – Mercado de Electricidad. <http://www.omel.es/>.
- [PowerWeb, URL] - <http://www.pserc.cornell.edu/powerweb/2.4/home.html>.
- [PowerWorld, URL] – PowerWorld Corporation. <http://powerworld.com/>.
- [REN, URL] – Rede Eléctrica Nacional. <http://www.ren.pt/>.
- [Reticular, URL] - <http://www.reticular.com/>.
- [SEPIA, URL] – SEPIA: Complex Adaptive Strategies – New Tools for the Power Industry.
[http:// www.htc.honeywell.com/projects/sepia/](http://www.htc.honeywell.com/projects/sepia/).
- [Sheblé, URL] – Homepage Prof. Gerald Sheblé. <http://vulcan.ee.iastate.edu/~sheble/>.
- [Tsfatsion, URL] - Home Page Leigh Tsfatsion - Iowa State University - Department
of Economics. <http://www.econ.iastate.edu/faculty/tsfatsion/>.
- [ZEUS, URL] – The Zeus Toolkit. <http://www.labs.bt.com/projects/agents/zeus/>.