



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



Contratos Bilaterais em Mercados Multi-Agente de Energia Eléctrica: Protocolo de Ofertas Alternadas

BRUNO RICARDO RAIMUNDO PEREIRA

(Licenciado)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – Ramo de Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa (ISEL)
Doutor Fernando Jorge Ferreira Lopes (LNEG)

Júri:

Presidente: Professor Constantino Vital Sopa Soares (ISEL)
Vogais:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa (ISEL)
Doutor Fernando Jorge Ferreira Lopes (LNEG)
Professor Manuel Trigo Cândido da Silva (ISEL)

Novembro de 2011

*Aos meus pais,
Maria Pereira e Fernando Pereira
e à Sílvia.*

Agradecimentos

Agradeço ao meu professor e orientador, Prof. Doutor Jorge de Sousa. e ao meu co-orientador, Prof. Doutor Fernando Lopes pela oportunidade que me deram de realizar a minha dissertação de mestrado numa área de estudo interessante e actual como são os mercados multi-agente de energia eléctrica. Agradeço também todo o apoio e ensinamentos que me deram e o tempo disponibilizado durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais Maria Pereira e Fernando Pereira, pelo exemplo que sempre foram, pela educação que me deram e pela possibilidade que me ofereceram para fazer uma formação superior. À minha namorada Sílvia pelo apoio que sempre me deu e inspiração inesgotável que me proporcionou para terminar o meu curso.

Aos meus amigos, Paulo, José, Leandro e Ana, que nos momentos decisivos do meu percurso, me apoiaram ouvindo-me e aconselhando-me. Agradeço também a amizade que sentem por mim.

Ao ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, pela formação e conhecimento que me deu e pela experiência de estudar numa das escolas de referência do país no ensino da Engenharia.

Ao LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia e ao Doutor Augusto Novais, por me terem recebido e disponibilizado as instalações da UMOSE – Unidade de Modulação e Optimização de Sistemas Energéticos, para realizar este trabalho.

Aos meus amigos e colegas do ISEL que estudaram e trabalharam comigo durante a minha formação.

Resumo

A liberalização do sector eléctrico, e a consequente criação de mercados de energia eléctrica regulados e liberalizados, mudou a forma de comercialização da electricidade. Em particular, permitiu a entrada de empresas nas actividades de produção e comercialização, aumentando a competitividade e assegurando a liberdade de escolha dos consumidores, para decidir o fornecedor de electricidade que pretenderem. A competitividade no sector eléctrico aumentou a necessidade das empresas que o integram a proporem preços mais aliciantes (do que os preços propostos pelos concorrentes), e contribuiu para o desenvolvimento de estratégias de mercado que atraiam mais clientes e aumentem a eficiência energética e económica.

A comercialização de electricidade pode ser realizada em mercados organizados ou através de contratação directa entre comercializadores e consumidores, utilizando os contratos bilaterais físicos. Estes contratos permitem a negociação dos preços de electricidade entre os comercializadores e os consumidores.

Actualmente, existem várias ferramentas computacionais para fazer a simulação de mercados de energia eléctrica. Os simuladores existentes permitem simulações de transacções em bolsas de energia, negociação de preços através de contratos bilaterais, e análises técnicas a redes de energia. No entanto, devido à complexidade dos sistemas eléctricos, esses simuladores apresentam algumas limitações.

Esta dissertação apresenta um simulador de contratos bilaterais em mercados de energia eléctrica, sendo dando ênfase a um protocolo de ofertas alternadas, desenvolvido através da tecnologia multi-agente. Em termos sucintos, um protocolo de ofertas alternadas é um protocolo de interacção que define as regras da negociação entre um agente vendedor (por exemplo um retalhista) e um agente comprador (por exemplo um consumidor final).

Aplicou-se o simulador na resolução de um caso prático, baseado em dados reais. Os resultados obtidos permitem concluir que o simulador, apesar de simplificado, pode ser uma ferramenta importante na ajuda à tomada de decisões inerentes à negociação de contratos bilaterais em mercados de electricidade.

Palavras-chave: Mercados de energia eléctrica, sistemas multi-agente, simulador de mercados de energia eléctrica, contratos bilaterais de electricidade.

Abstract

The liberalization of the electricity sector and therefore the creation of regulated and liberalized electricity markets have changed the way of selling electricity. The liberalization of the electricity sector allowed the access of companies in the activities of production and retail, increasing competitiveness in this sector and also allowed the freedom of choice by consumers to choose the electricity supplier they want. The competitiveness in the electricity sector increased the need for companies, to offer to customers electricity prices more attractive than the prices offered by competitors. Competition also contributes to the development of retailing strategies to attract more customers and increase energetic and economic efficiency in the electrical system.

The electricity trade can be done in organized markets or by the direct contract between consumers and suppliers, using the bilateral contracts. This type of contracts allows both traders and consumers to negotiate the electricity prices.

Currently, there're computational tools to simulate the electricity markets, the existing tools allow to simulate transactions in pool markets, negotiation prices through bilateral contracts and to make technical analysis to electricity networks. However, due to the complexity of the electric systems, these simulators have some degree of limitation.

In this thesis, we propose a simulator of electricity bilateral contracts, emphasising a alternating offers protocol, developed through multi-agent technology. The alternating offers protocol is an interaction protocol, which defines the rules of negotiation between the negotiation parties.

This simulator was used to simulate a practical case based on real data. The final results allows to conclude that the simulator, though its simplicity can be an important tool to help in the decision process that comes with the negotiation of bilateral contracts in electricity markets.

Keywords: Electricity markets, multi-agent systems, energy markets simulator, bilateral contracts of electricity.

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Abreviaturas.....	x
Lista de Símbolos	xi
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 Motivações	2
1.2 Objectivos.....	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
Capítulo 2: Estado da Arte	6
2.1 Mercados de Energia Eléctrica	6
2.1.1 Introdução.....	6
2.1.2 Entidades do Mercado de Energia Eléctrica	8
2.1.3 Reestruturação do Sector da Energia Eléctrica	13
2.1.4 Modelos de Mercado.....	16
2.1.4.1 Modelo em Bolsa (<i>Pool</i>)	16
2.1.4.2 Modelo de Contratos Bilaterais Físicos.....	19
2.1.4.3 Modelo Híbrido	20
2.1.5 MIBEL - Mercado Ibérico de Energia Eléctrica	21
2.1.5.1 Operadores de Mercado OMEL e OMIP.....	25
2.1.5.2 Interligação entre Portugal e Espanha.....	26
2.1.6 Mercado Português de Energia Eléctrica.....	27
2.1.7 Tarifas e Preços	30

2.2. Sistemas Multi-Agente	33
2.2.1 Introdução.....	33
2.2.2 Agentes Autónomos	34
2.2.2.1 Agentes Deliberativos	36
2.2.2.2 Agentes Reactivos	37
2.2.2.3 Agentes Híbridos.....	38
2.2.2.4 Agentes BDI	38
2.2.3 Plataformas Computacionais para Sistemas Multi-Agente.....	39
2.3 Conclusão.....	41
 Capítulo 3: Mercado Multi-Agente de Energia Eléctrica	 42
3.1 Introdução.....	42
3.2 Simuladores de Mercados de Energia Eléctrica	43
3.2.1 EMCAS.....	43
3.2.2 PowerWeb.....	44
3.2.3 SEPIA	45
3.2.4 AMES	45
3.2.5 MASCEM.....	46
3.2.6 Comparação entre os Simuladores.....	46
3.3 Mercado Multi-Agente de Energia Eléctrica.....	49
3.3.1 Agentes Computacionais Autónomos	49
3.3.2 Negociação entre Agentes Computacionais	51
3.4 Conclusão.....	53
 Capítulo 4: SCBE — Simulador de Contratos Bilaterais de Electricidade	 55
4.1 Introdução.....	55
4.2 Interface.....	56
4.3 Protocolo de ofertas alternadas	60
4.3.1 Representação por Diagrama de Estados	60
4.3.2 Representação segundo o modelo da FIPA	62
4.3.3 Descrição do Algoritmo Implementado	63

4.4 Comunicação entre Agentes	66
4.5 Conclusão.....	68
Capítulo 5: Caso de Estudo: Negociação Bilateral no Mercado Retalhista	69
5.1. Introdução.....	69
5.2. Análise de Resultados.....	71
Capítulo 6: Conclusão	75
6.1 Principais Aspectos	75
6.2 Desenvolvimento Futuro	77
Referências	78

Lista de Figuras

Figura 2.1 — Transição do regime monopolista para o regime liberalizado.	7
Figura 2.2 — Esquema simplificado do mercado de energia eléctrica.	8
Figura 2.3 — Estrutura do sistema eléctrico em mercados de energia.	9
Figura 2.4 — Estrutura e funcionamento do mercado de energia baseado no modelo Pool. ...	17
Figura 2.5 — Curvas de oferta e procura num mercado Pool Simétrico.....	18
Figura 2.6 — Curva de oferta num mercado Pool Assimétrico.	18
Figura 2.7 — Estrutura e funcionamento do mercado de energia baseado no modelo Híbrido.	20
Figura 2.8 — Modelo de Mercado no MIBEL.	22
Figura 2.9 — Modelo de funcionamento do MIBEL.....	24
Figura 2.10 — Market splitting no MIBEL em 2010.	27
Figura 2.11 — Aditividade Tarifária: Tarifas de Acesso às redes.	32
Figura 2.12 — Aditividade Tarifária: Tarifas de Venda a Clientes Finais	33
Figura 2.13 — Um agente e o seu ambiente.....	35
Figura 2.14 — Arquitectura de um Agente Deliberativo.	37
Figura 2.15 — Arquitectura de um Agente Reactivo.	37
Figura 2.16 — Arquitectura de um Agente BDI.	39
Figura 3.1 — Mercado de energia multi-agente.	49
Figura 4.1 — Janelas iniciais do simulador.	56
Figura 4.2 — Janela do agente comprador com os preços e volumes de energia.	57
Figura 4.3 — Janela do agente comprador com os parâmetros da pré-negociação.	58
Figura 4.4 — Janela do agente comprador com as preferências e as estratégias.	58
Figura 4.5 — Janelas finais do agente comprador e vendedor.....	59
Figura 4.6 — Janelas de aviso ao utilizador.....	60
Figura 4.7 — Diagrama de estados do protocolo de ofertas alternadas.....	61
Figura 4.8 — Protocolo de ofertas alternadas proposto.....	63
Figura 4.9 — Plataforma de gestão dos agentes definido pela FIPA.	68
Figura 5.1 — Evolução do processo negocial.	72

Figura 5.2 — Evolução dos preços das propostas do agente comprador.	72
Figura 5.3 — Evolução dos preços das propostas do agente vendedor.....	73
Figura 5.4 — Utilidades das propostas recebidas e enviadas pelo agente vendedor.	74

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 — Evolução cronológica da liberalização do sector eléctrico europeu, português e espanhol.	15
Tabela 2.2 — Estrutura actual do sistema eléctrico português.	30
Tabela 3.1 — Características dos simuladores de mercados de energia eléctrica analisados.	48
Tabela 5.1 — Preços e volumes de energia de uma contratação bilateral real.	70
Tabela 5.2 — Parâmetros para a negociação do vendedor.	70
Tabela 5.3 — Parâmetros para a negociação do comprador.	71
Tabela 5.4 — Resultados da simulação do caso prático.	71
Tabela 5.5 — Utilidades das propostas enviadas e recebidas pelo agente vendedor.	73
Tabela 5.6 — Comparação entre os valores da simulação e do contrato real.	74

Lista de Abreviaturas

AT — Alta Tensão

ACL — Agent Communication Language

BDI — Beliefs, Desires, Intentions

BT — Baixa Tensão

BTE — Baixa Tensão Especial

CAEs — Contratos de Aquisição de Energia

DSM — Demand-Side Management

EDP — Grupo Energias de Portugal, S.A.

ERSE — Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

EU — União Europeia

EUA — Estados Unidos da América

FIPA — Foundation for Intelligent Physical Agents

ICL — Interagent Communication Language

JADE — Java Agent Development Framework

MAT — Muito Alta Tensão

MaxOS — Máximo Operador de Sistema

MinOS — Mínimo Operador de Sistema

MIBEL — Mercado ibérico de electricidade

MT — Média Tensão

OAA — Open Agent Architecture

OM — Operador de Mercado

OMEL — Operador do mercado ibérico de electricidade (Pólo Espanhol)

OMIClear — Sociedade de Compensação de Mercados de Energia

OMIP — Operador do mercado ibérico de electricidade (Pólo Português)

OS — Operador de Sistema

OTC — Over The Counter

PRE — Produção em Regime Especial

SCBE — Simulador de Contratos Bilaterais de Electricidade

SMA — Sistemas Multi-Agente

Lista de Símbolos

Símbolo	Interpretação
ag_c	Agente comprador
ag_v	Agente vendedor
f	Factor de concessão
i	Conjunto de dois agentes genéricos, a e b
k	Período de uma proposta
$pedprop$	Pedido de proposta do agente comprador ao agente vendedor
$prop_{t_1}$	Proposta inicial do agente vendedor
$prop_{t_n}$	Proposta num determinado instante de tempo t_n
$prop_{t_{n+1}}$	Contraproposta enviada como resposta a uma proposta $prop_{t_n}$
$prop_{t_n}^a$	Proposta enviada por um agente a no instante t_n
$prop_{t_{n+2}}^a$	Proposta enviada pelo agente a após o envio da proposta $prop_{t_n}^a$
$p_{t_n}^k$	Preço da proposta $prop_{t_n}^a$ do período k
$p_{t_{n+1}}^k$	Preço da proposta $prop_{t_{n+2}}^a$ do período k
t_n	Instante de tempo genérico, $n \in \mathbb{N}$
T	Conjunto de instantes de tempo t_n
lim_k	Limite do item de negociação no período k
U_{rcv}	Utilidade da proposta recebida
U_{cmp}	Utilidade da proposta a enviar
$U_i(X)$	Função utilidade para um conjunto de itens X de um agente i
$V_k^i(x_k)$	Função marginal de um agente i para o item x_k
V_k	Volume de energia no período k
w_k	Peso do item de negociação no período k
x_k	Item de negociação no período k
X	Conjunto dos itens de negociação x_k

Capítulo 1

Introdução

O sector energético em geral, e o sector eléctrico em particular, têm tido nas últimas décadas uma grande importância no desenvolvimento das empresas e sociedades. A indústria eléctrica disponibiliza energia aos consumidores industriais, comerciais e domésticos através de uma rede de transporte e de distribuição. Esta indústria envolve normalmente cinco áreas de actividade: produção, transporte, distribuição, comercialização e operação de mercados de energia. A electricidade é produzida em centrais electroprodutoras usando gás natural, carvão, urânio, produção hidroeléctrica e outras energias renováveis, sendo posteriormente transmitida através de uma rede de transporte até próximo de zonas residenciais a muito alta e alta tensão (em Portugal entre 60 kV e 400 kV) para reduzir as perdas energéticas, e finalmente distribuída a média tensão (em Portugal a 60 kV ou valores inferiores, como por exemplo 30, 15 e 10 kV) e baixa tensão (400/230 V).

Os princípios básicos da comercialização de energia não têm variado muito ao longo do tempo. Os consumidores finais (empresas ou particulares) compram aos comercializadores os volumes de energia que necessitam de consumir. Em mercados de energia eléctrica liberalizados, os consumidores tendem a contratar energia a comercializadores que lhes ofereçam preços mais baixos e maiores garantias de fiabilidade e qualidade de serviço.

Na prática, a comercialização é normalmente efectuada de dois modos distintos: através de mercados organizados (em bolsa) ou directamente através de contratos bilaterais físicos. Nos mercados em bolsa (*Pool*), os participantes operam num leilão onde submetem ao operador de mercado licitações de venda e de compra de energia para um determinado período. Posteriormente, o operador de mercado analisa as propostas recebidas, ordenando de forma crescente as ofertas de venda (curva de oferta) e de forma decrescente as ofertas de compra (curva de compra). O preço de mercado é definido graficamente pela intersecção das duas curvas. Nos contratos bilaterais físicos, os compradores e os vendedores negociam

directamente os preços, volumes de energia e duração dos contratos, não sendo necessário recorrer à bolsa para contratar electricidade.

Até à década de setenta do século XX, o sector eléctrico era tradicionalmente controlado por empresas estatais ou monopolistas, que detinham o poder sobre praticamente todas as infra-estruturas, desde a produção até à comercialização de energia. Este sector era normalmente considerado um monopólio natural e os consumidores não podiam escolher de forma livre o seu fornecedor de energia eléctrica. A sua liberalização e a integração de mercados de energia de diferentes países a nível mundial iniciou-se na década de oitenta, mas foi na década de noventa que aconteceu a uma maior escala, permitindo separar as funções nucleares de produção e comercialização de energia, das funções cruciais de transporte e distribuição de energia. Esta separação originou um mercado grossista, onde diferentes produtores oferecem competitivamente a sua energia a vários retalhistas, e um mercado retalhista, onde consumidores finais seleccionam os seus fornecedores a partir de retalhistas que operam competitivamente.

A presente dissertação incide no modelo de mercado relativo aos contratos bilaterais, propondo-se uma ferramenta computacional baseada em tecnologia multi-agente, com particular ênfase num protocolo de ofertas alternadas, que permite simular a negociação entre comercializadores e consumidores de energia eléctrica.

1.1 Motivações

Com a evolução crescente do sistema eléctrico e o aumento da sua complexidade, torna-se gradualmente mais importante o seu estudo e modelação, por forma a encontrar soluções para melhorar o sistema a nível técnico, económico e ambiental. Com a liberalização do sector eléctrico, o mercado de energia tornou-se mais competitivo, exigindo às empresas comercializadoras estratégias de mercado mais elaboradas e eficazes. Por esta razão, é importante o desenvolvimento de ferramentas computacionais que permitam a simulação e análise de opções económicas diferentes, para que as empresas tenham um suporte de apoio na tomada de decisões estratégicas para os seus negócios.

Os sistemas multi-agente (SMA) representam uma nova forma de analisar, projectar e implementar sistemas reais complexos. A visão baseada em agentes oferece um relatório poderoso de técnicas e ferramentas que têm o potencial de melhorar consideravelmente a forma como os cientistas concebem e implementam sistemas computacionais [Jennings et al., 1998]. Em termos conceptuais, um sistema multi-agente composto por agentes computacionais capazes de executarem acções de forma autónoma representa uma abordagem ideal para modular o domínio (naturalmente) distribuído de um mercado de energia liberalizado.

Nos últimos anos, têm surgido várias ferramentas computacionais baseadas em sistemas multi-agente, aplicadas aos mercados de energia eléctrica, nomeadamente:

- EMCAS - Electricity Market Complex Adaptative System: os agentes computacionais possuem competência negocial e têm capacidade de aprender e adaptarem-se a novas situações.
- AMES - Agent Based Modelling of Electricity Systems: ferramenta laboratorial de código aberto que permite estudar os mercados grossistas de electricidade; foi desenvolvida de acordo com as exigências da Federal Energy Regulatory Commission (FERC) dos EUA, para o mercado grossista de energia eléctrica.

Também é importante mencionar o sistema MASCEM, um simulador multi-agente de mercados de energia eléctrica que suporta vários modelos de mercado e captura características relevantes dos agentes do mercado de energia. Mais especificamente, o simulador inclui um operador de mercado, um operador de sistema, produtores, consumidores e retalhistas. Além disso, pode simular mercados em bolsa e contratos bilaterais. O simulador também integra dados (reais) do mercado ibérico, permitindo aos utilizadores definir cenários realistas.

No entanto, apesar da versatilidade e capacidades do MASCEM e de outros simuladores de mercados de energia existentes, muitos deles são limitados a modelos particulares de mercado, a tipos específicos de participantes do mercado, e características particulares dos intervenientes no mercado. Actualmente, existe uma necessidade crescente de desenvolver simuladores de mercados de electricidade, que podem ser cruciais para enfrentar os desafios complexos colocados pelos mercados de energia eléctrica.

1.2 Objectivos

Os principais objectivos da presente dissertação são os seguintes:

1. Desenvolvimento de um mercado de energia multi-agente simplificado, composto por agentes computacionais que representam produtores de energia, retalhistas e consumidores finais; irá ser dada particular atenção ao mercado retalhista;
2. Implementação de agentes computacionais com poder para negociarem os termos de diferentes contratos bilaterais; em particular, o trabalho irá centralizar-se no desenvolvimento de um protocolo de ofertas alternadas, que possibilite a troca iterativa de propostas e contra-propostas entre duas partes negociais;
3. Estudo de um caso prático relativo a um mercado de retalho, envolvendo a negociação de contratos bilaterais entre um retalhista e um consumidor de energia.

A presente dissertação pretende utilizar o potencial da tecnologia baseada em agentes no desenvolvimento de uma ferramenta computacional que permita apoiar a negociação de contratos bilaterais entre comercializadores e consumidores, em mercados retalhistas simplificados. A ênfase do trabalho será colocada no desenvolvimento de um protocolo de ofertas alternadas, que define as regras de interacção entre comercializadores e consumidores.

Para efectuar o programa computacional proposto irá recorrer-se à linguagem de programação Java e à ferramenta multi-agente JADE (<http://jade.tilab.com>).

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação é constituída por seis capítulos.

- Capítulo 1: Faz-se uma introdução sucinta do enquadramento da dissertação, indicam-se os principais temas abordados e apresentam-se as motivações e os objectivos para a elaboração deste trabalho;
- Capítulo 2: Apresenta-se o Estado da Arte, onde se descrevem os dois temas centrais deste trabalho: mercados de energia eléctrica e sistemas multi-agente. Inicia-se o capítulo com a descrição geral de um mercado de energia eléctrica, explicando o seu conceito, características, modelos principais, e indicando-se os seus constituintes. Neste capítulo também se descreve o processo de liberalização do sector eléctrico, que aconteceu a nível mundial, dando destaque ao processo de liberalização europeu e português. Faz-se referência ao MIBEL e indicam-se algumas das etapas necessárias até à sua plena implementação em Portugal e Espanha. Além disso, faz-se referência aos operadores de mercado do MIBEL, o OMIP e o OMEL, e descrevem-se algumas características da interligação entre Portugal e Espanha, bem como o conceito de “*Market Splitting*” (entre os dois países). Posteriormente, faz-se uma descrição do mercado de energia eléctrica português, indicando as suas principais características, o modo de funcionamento das cinco actividades essenciais do sector eléctrico (produção, transporte, distribuição, consumo e operação de mercados), e explicando quais as tarifas aplicadas ao sector eléctrico português e como se definem os preços da electricidade. Além da descrição dos mercados de energia eléctrica, também se efectua uma descrição sucinta dos sistemas multi-agente, explicando o conceito de agente, as suas arquitecturas e ambientes, e finalmente descrevendo algumas plataformas existentes para o desenvolvimento e simulação de sistemas multi-agente;
- Capítulo 3: Descrevem-se os mercados de energia eléctrica multi-agente, indicando-se algumas vantagens da sua aplicação. Apresenta-se uma análise comparativa dos principais simuladores de mercados de energia existentes. Indicam-se os principais desafios conceptuais a superar na realização do simulador proposto nesta dissertação. Aborda-se o tema da negociação entre agentes computacionais e define-se e caracteriza-se os agentes intervenientes em contratos bilaterais de electricidade;
- Capítulo 4: Apresenta-se o simulador SCBE – Simulador de Contratos Bilaterais de Electricidade, elaborado neste trabalho. Começa-se por descrever e exemplificar a utilização da interface do SCBE. Posteriormente, descreve-se o funcionamento do protocolo de ofertas alternadas, apresentando-se inicialmente uma descrição formal e

posteriormente uma descrição focada no algoritmo desenvolvido. Finalmente refere-se de forma sucinta a comunicação entre agentes computacionais na plataforma JADE, utilizada para o desenvolvimento do SCBE;

- Capítulo 5: Descreve-se a aplicação e teste do simulador a um caso prático. Utilizam-se dados baseados numa situação real de comercialização de electricidade no mercado retalhista. Analisam-se os resultados obtidos;
- Capítulo 6: Apresentam-se as conclusões resultantes do trabalho efectuado, indicando-se alguns aspectos do simulador que podem ser melhorados e tópicos que podem ser abordados em trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Mercados de Energia Eléctrica

2.1.1 Introdução

Após a Segunda Guerra Mundial, e como consequência da destruição de uma parte dos sistemas eléctricos existentes, alguns países europeus que consideravam o sector eléctrico um sector estratégico e de grande interesse publico para o fornecimento de energia eléctrica, decidiram criar empresas verticalmente integradas, responsáveis pela produção, transporte e em alguns casos pela distribuição da energia. As empresas do sector eléctrico eram consideradas monopólios naturais e em alguns países foram nacionalizadas.

Na década de setenta do século XX, depois do primeiro choque petrolífero, os custos no sector energético aumentaram, o que fez com que alguns países comesçassem a ter preocupações económicas que até então não tinham tido. Por esta razão, o modelo monopolista do sector eléctrico sofreu alterações que permitiram iniciar a transição para um modelo liberalizado, que possibilita aumentar a competitividade e diminuir os custos da energia.

Nos últimos anos, com especial importância a partir 1990, o sector eléctrico sofreu uma profunda alteração estrutural à escala mundial, que se pode designar genericamente por “reforma”. A “reforma” permitiu alterar os modelos de monopólio verticalmente integrados e transformá-los em modelos liberalizados, com separação vertical e horizontal. A Figura 2.1 apresenta de forma esquemática a passagem do modelo monopolista para o modelo liberalizado. Esta alteração consistiu basicamente na liberalização dos segmentos potencialmente competitivos, como a produção e a comercialização e na regulação dos segmentos normalmente considerados como monopólios naturais, como o transporte e a

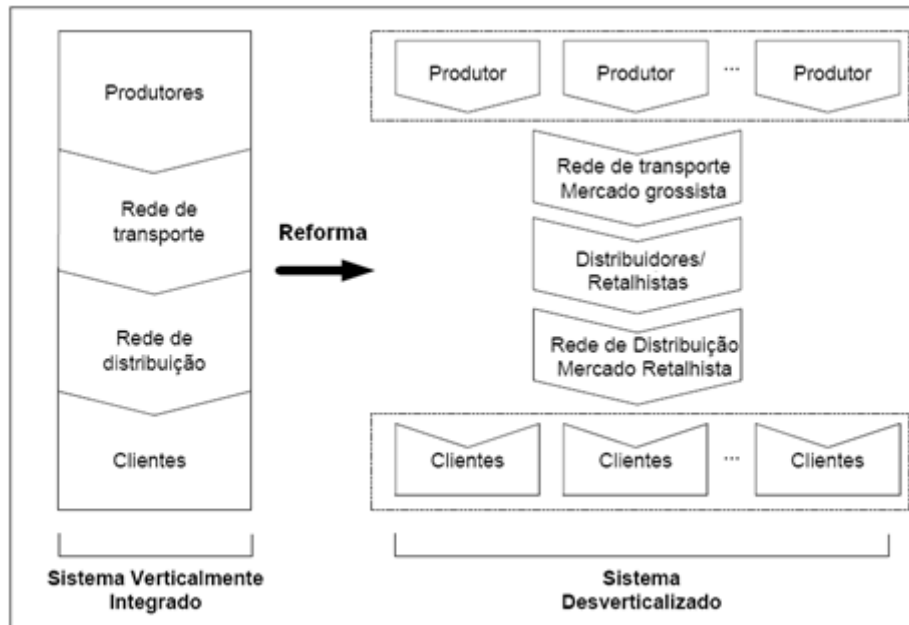


Figura 2.1 — Transição do regime monopolista para o regime liberalizado. Adaptado de [Azevedo, 2007].

distribuição. De realçar que o transporte e a distribuição são considerados monopólios naturais porque não se justifica a duplicação das redes eléctricas destas duas actividades, uma vez que a sua duplicação não é economicamente viável.

A liberalização do sector eléctrico permitiu aumentar a competitividade das empresas nas actividades de produção e comercialização, e conseqüentemente a eficiência no sector eléctrico. Para garantir esta competitividade é necessário garantir o acesso livre e sem discriminação às redes de transporte. Para isso, é necessária uma entidade independente que seja responsável pelo controlo operacional da rede, que se designa por operador de sistema (OS). De realçar, que a liberalização também veio dar liberdade aos consumidores para escolherem os seus fornecedores de energia.

Em termos genéricos, a competitividade no regime liberalizado permite um incentivo maior à minimização do custo do que o dado pela regulação baseado nos custos de serviço, e resulta em fornecedores a tomarem medidas de poupança e a inovarem mais rapidamente. As medidas incluem técnicas para otimizar processos de trabalho, reparações mais eficientes, e investimentos mais ponderados e acertados. Outra vantagem da competitividade é a tendência para manter o preço de electricidade baixo, próximo do custo marginal [Stoft, 2002].

O mercado de energia eléctrica é o lugar onde a negociação competitiva de energia, entre compradores e vendedores, ocorre. Os preços de mercado são indicadores fiáveis, não só para os participantes do mercado eléctrico, mas também para outros mercados financeiros, e para os consumidores de electricidade. O mercado de energia tem um funcionamento neutro e independente e tem a função de liquidação [Shahidehpour et al., 2002].

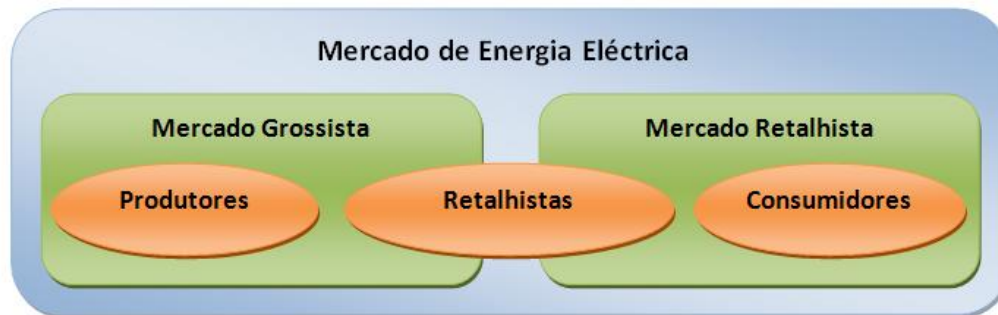


Figura 2.2 — Esquema simplificado do mercado de energia eléctrica.

A liberalização do sector eléctrico e a desintegração do sistema monopolista permitiu dividir o mercado de energia eléctrica em dois novos mercados, o mercado grossista e o mercado retalhista (ver Figura 2.2).

Mercado Grossista

O mercado grossista é constituído pelos produtores e pelos retalhistas (agregadores e “*brokers*”). Os produtores vendem energia eléctrica aos retalhistas, que posteriormente vão transaccioná-la no mercado retalhista. O mercado grossista caracteriza-se por ter contratações de grandes quantidades de energia, geralmente na ordem de grandeza das centenas e milhares de MWh. Neste mercado, as contratações de energia podem ser realizadas em regime de modelo em bolsa, onde os participantes de mercado fazem as suas licitações de compra e venda de energia, ou através de contratação bilateral.

Mercado Retalhista

No mercado retalhista, actuam os retalhistas e os consumidores finais. Os retalhistas compram a energia no mercado grossista para posteriormente vendê-la no mercado de venda a retalho aos consumidores finais através de contratação directa, utilizando os contratos bilaterais físicos. Os retalhistas são geralmente as empresas de distribuição, os agregadores, ou os “*brokers*”. No mercado retalhista, as quantidades de energia contratada são normalmente menores do que no mercado grossista.

2.1.2 Entidades do Mercado de Energia Eléctrica

O processo necessário para a entrega da electricidade contratada pelos consumidores, desde os centros electroprodutores até aos seus pontos de consumo, depende de várias entidades presentes em diferentes actividades (produção, transporte, distribuição, comercialização e operação de mercados), que constituem a cadeia de valor do sistema eléctrico, como por exemplo produtores de energia, operadores da rede de transporte, empresas responsáveis pela exploração da rede de distribuição e comercializadores. A Figura 2.3 apresenta esquematicamente as actividades principais do sistema eléctrico.

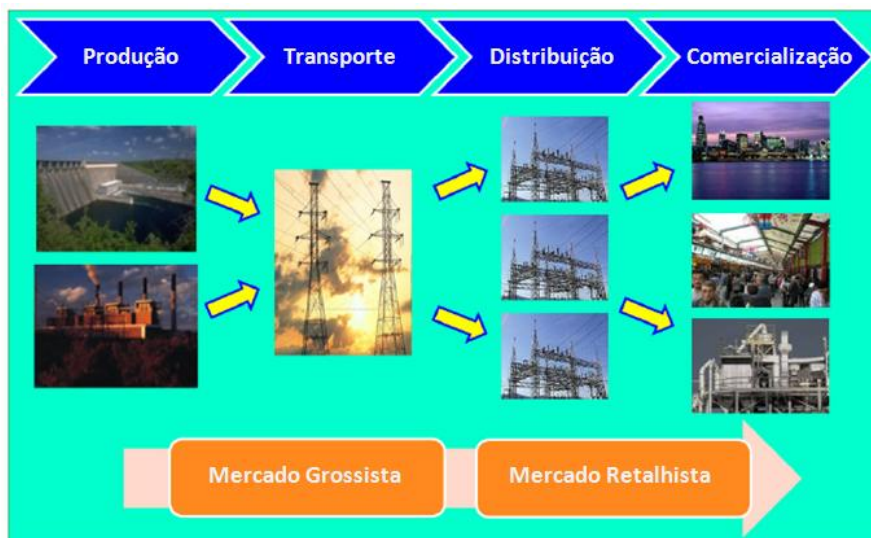


Figura 2.3 — Estrutura do sistema eléctrico em mercados de energia [Lopes et al., 2010].

Operador de Mercado

Nos mercados organizados em bolsa, o operador de mercado (OM) é a entidade responsável pelo funcionamento da bolsa de energia eléctrica. É o OM que supervisiona o funcionamento da bolsa, recebe as propostas de compra e venda, define o preço da electricidade (preço de mercado) e as propostas aceites em cada período de negociação [Pereira, 2004].

O OM é uma entidade independente, não governamental e sem fins lucrativos, que garante um mercado competitivo, executando um leilão para o comércio de energia eléctrica. O OM calcula o preço de mercado com base nas licitações de compra e venda realizadas pelos participantes do mercado [Shahidehpour et al., 2002].

No Mercado Ibérico de electricidade (MIBEL), existem dois operadores de mercado, o OMEL (pólo espanhol) responsável pela gestão do mercado diário e intradiário, e o OMIP (pólo português) responsável pela gestão do mercado a prazo.

Operador de Sistema

O operador de sistema (OS) é a entidade responsável pela gestão técnica da rede de transporte e possui três grandes objectivos: assegurar a manutenção da segurança do sistema, garantir a qualidade de serviço, e promover a equidade e a eficiência económica. Para atingir esses objectivos, é concedido ao operador de sistema o poder de estabelecer as regras de relacionamento entre os produtores e os consumidores, de efectuar a programação e o despacho dos geradores, da carga e dos serviços auxiliares, e de gerir os vários tipos de mercados de energia [Azevedo, 2007].

Para o OS conseguir gerir a rede de transporte 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, o OS analisa a viabilidade técnica para cada período do dia seguinte, prestando particular atenção às situações de congestionamento [Pereira, 2004].

Em geral, existem duas estruturas possíveis para um OS, estando a escolha dependente dos objectivos e da autoridade do OS. A primeira estrutura (MinOS) diz respeito principalmente, à manutenção da segurança da rede de transporte de electricidade nas operações do mercado de energia, na medida em que o operador de sistema é capaz de planear o horário das transferências de energia num sistema de transporte limitado. Esta estrutura do OS baseia-se no modelo de mercado com coordenação multilateral, não tendo o OS nenhum papel de gestão no mercado. A segunda estrutura (MaxOS) inclui um operador de mercado (OM), que é parte integrante da operação do OS. Em algumas estruturas de mercado, o responsável pelo OM é uma entidade separada do OS, embora por vezes façam parte da mesma organização. [Shahidehpour et al., 2002].

No MIBEL há dois operadores de sistema que exercem funções típicas de uma estrutura MinOS, o operador de sistema português REN — Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A, e o espanhol REE — Red Eléctrica de España. A REN exerce a actividade de transporte mediante uma concessão atribuída pelo Estado Português, em regime de serviço público e de exclusividade.

Produtores

Os produtores de energia eléctrica são as entidades operadoras dos centros electroprodutores, responsáveis pela produção da energia comercializada através de mercados organizados e de contratos bilaterais físicos.

Os produtores são independentes do OS ou da rede de transporte, por forma a garantir uma completa imparcialidade, e assegurando dessa forma um mercado livre e concorrencial (onde imperam as regras do mercado). Como actuam num ambiente de mercado liberalizado, os produtores não podem exercer qualquer tipo de discriminação contra outros participantes do mercado, bem como fixar preços ou exercer poder de mercado. As comunicações de saídas de serviço para manutenção programada deverão ser efectuadas previamente ao OS, devendo o produtor aguardar a comunicação de aprovação [Azevedo, 2007].

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 [Pereira, 2004].

Rede de Transporte

A rede de transporte é um elemento essencial do sistema eléctrico, utilizada para transportar a energia eléctrica a partir das centrais electroprodutoras para as zonas de distribuição e de

consumo. Esta infra-estrutura é normalmente operada e gerida pelo OS em regime de monopólio. O acesso às redes de transporte deve ser livre e não discriminatório para que seja possível a todos os produtores e comercializadores participarem no mercado de energia eléctrica de forma equitativa. Em situações de mercados de energia que integram vários países, as redes de transporte constituem as infra-estruturas de interligação entre as suas redes eléctricas.

Distribuidores

Os distribuidores são as entidades que assumem a função de receber a energia transmitida nas redes de transporte e distribuí-la para os pontos de consumo finais. Estas entidades têm responsabilidades técnicas no âmbito da qualidade de energia eléctrica e da continuidade de serviço.

À semelhança do que se passou com as redes de transporte, a actividade de distribuição manteve-se em regime de monopólio natural por razões económicas, ambientais e operacionais. A principal função dos distribuidores é fornecer energia eléctrica aos consumidores finais, sendo a sua actividade regulada pelo estado ou por uma entidade reguladora [Azevedo, 2007]. Em Portugal, a actividade de distribuição é realizada pela EDP Distribuição (empresa do grupo EDP) em regime de monopólio regulado.

Os distribuidores podem realizar o planeamento em tempo útil para a sua rede de distribuição, por forma a conseguir fornecer serviços aos consumidores finais com maior fiabilidade e conseqüentemente aumentar a sua receita. O planeamento da rede de distribuição no sistema de energia eléctrica é uma tarefa complexa, em que os responsáveis pelo seu planeamento devem garantir que existe uma capacidade adequada na subestação (capacidade do transformador) e de alimentação (capacidade da rede de distribuição) para conseguir satisfazer a procura de carga [Oo, 2005].

Comercializadores

Os comercializadores podem ser divididos em dois grupos: os grossistas, que comercializam no mercado grossista (neste grupo estão inseridos os produtores de energia), e os retalhistas, que comercializam no mercado retalhista, vendendo energia a retalho aos consumidores finais. Um retalhista tem apenas uma função de comercialização, não tendo capacidade de produção. Para exercer a actividade de comercialização, necessita de uma licença para transaccionar serviços de electricidade no mercado.

O retalhista fornece ligações de negócio entre produtores de energia e consumidores finais, e pode cooperar com empresas locais de distribuição para a entrega de energia aos consumidores. O retalhista de energia é motivado financeiramente e pode participar activamente no mercado grossista e no mercado retalhista, a fim de maximizar a sua rentabilidade. O sucesso do retalhista de energia pode estar nas suas estratégias de

“marketing”, bem como na sua capacidade em obter fornecimento de energia no mercado grossista, a preços competitivos, e com sucesso vender esse energia no mercado retalhista [Oo, 2005].

Os agregadores de clientes e os “*brokers*” (intermediários) encaixam no perfil de um retalhista de energia. Além destes dois tipos de comercializadores, existe também um comercializador relacionado com a gestão do risco financeiro a que os produtores e retalhistas estão sujeitos, denominado de “*marketer*”.

Agregadores: Um agregador é uma entidade ou uma empresa que combina os clientes num grupo de compra. Cada agregador pode comprar grandes quantidades de energia eléctrica e outros serviços a preços mais baixos do que se o fizesse individualmente. O agregador pode agir como um agente (*broker*) entre clientes e retalhistas. Quando um agregador compra energia para vender posteriormente, age como um retalhista, devendo ser qualificado como tal [Shahidehpour et al., 2002].

“Brokers”: Um “*broker*” de energia eléctrica é uma entidade ou empresa que actua como um intermediário num mercado em que esses serviços são vendidos, comprados, e comercializados. Um “*broker*” não produz, compra ou vende energia eléctrica, mas facilita as transacções entre compradores e vendedores. Quando um *broker* está interessado em adquirir um título em transacções de energia eléctrica, é classificado como produtor ou retalhista. Um *broker* pode agir como um agente entre os produtores ou agregações de empresas de produção e os “*marketers*” [Shahidehpour et al., 2002].

“Marketers”: A actividade destes agentes consiste em assumir parte do risco financeiro a que estão expostos os produtores, os distribuidores/retalhistas, e grandes consumidores finais, recebendo em troca uma determinada quantia. Como são excelentes conhecedores da origem e da correlação do risco subjacentes a cada contrato, os “*marketers*” estabelecem contratos e adquirem serviços de sistema para a cobertura dos riscos a que estão expostos [Azevedo, 2007].

Consumidores

Os consumidores estão interligados à rede de distribuição se forem pequenos consumidores ou à rede de transporte se forem grandes consumidores. Estes representam as entidades finais da cadeia de valor do sistema eléctrico e podem dividir-se em categorias diferentes, dependendo da sua potência instalada e do nível de tensão eléctrica a que recebem a energia. Os consumidores podem ser do tipo industrial, como por exemplo indústrias metalúrgicas, petroquímicas, ou outras indústrias, ou então podem ser consumidores mais pequenos, como por exemplo consumidores do sector comercial, de serviços, do sector público e transportes, ou mesmo consumidores domésticos.

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 dos períodos de ponta de consumo, podendo também escolher o pacote de serviços (tendo em conta, por exemplo, o nível de fiabilidade) que mais lhes convém [Pereira, 2004].

2.1.3 Reestruturação do Sector da Energia Eléctrica

O modelo organizacional tradicional do sector eléctrico começou a ser posto em causa na década de setenta do século XX, nos Estados Unidos da América, na sequência do primeiro choque petrolífero, com a publicação em 1978 da PURPA — *Public Utility Regulatory Policies Act*, que criou a figura do produtor independente e a obrigação das empresas concessionárias monopolistas adquirirem a energia por eles produzida. Em 1992, o *Energy Policy Act* trouxe a revisão da PURPA, ordenando o planeamento integrado de recursos para todas as concessionárias, bem como a inclusão de um conjunto alargado de medidas de conservação de energia e de gestão da procura [Paiva, 2007].

A liberalização do sector eléctrico e a integração de mercados de energia de diferentes países, a nível mundial, começou em 1982 no Chile. O Chile criou uma agência, denominada de *Comisión Nacional de Energía*, com o objectivo de promover novas políticas energéticas permitindo o investimento de capitais privados nas empresas do sector eléctrico, e desta forma aumentando a competitividade neste sector. Alguns anos mais tarde, outros países da América do Sul seguiram o processo de reestruturação do Chile, como por exemplo a Argentina em 1992, o Peru em 1993, e a Bolívia e a Colômbia em 1994 [Rudnick e Zolezzi, 2001].

Na Europa, o primeiro exemplo de reestruturação aconteceu na Grã-Bretanha e consistiu na criação de um mercado de energia em bolsa entre a Inglaterra e o País de Gales, através da publicação do *Electricity Act* em 1989. O *Electricity Act* permitiu iniciar a privatização de empresas do sector eléctrico, aumentando a concorrência nos subsistemas da produção e da distribuição. Além disso, criou uma entidade independente para gerir o transporte, denominada por *National Grid Company*. Neste modelo inicial, apenas era possível a comercialização de energia através do modelo em bolsa. Em Março de 2001, o mercado de produção de energia eléctrica de Inglaterra e do País de Gales foi submetido a uma reforma importante, tendo sido o modelo de mercado em vigor substituído pelo *New Electricity Trading Arrangements*, NETA. A comercialização da energia eléctrica para o dia seguinte, que era realizada obrigatoriamente em bolsa, passou também a ser possível através de contratos bilaterais. Esta alteração reduziu o âmbito do mercado organizado, até então em vigor. No dia 1 de Abril de 2005 foi criado um mercado grossista de energia eléctrica único para a Grã-Bretanha, com a inclusão da Escócia, através da implementação do *British Trading and Transmission Arrangements*, BETTA. As principais características do mercado grossista de energia eléctrica da Grã-Bretanha consistem num elevado número de participantes e numa elevada liquidez do mercado de contratos

bilaterais. Os mercados organizados contabilizam uma reduzida quota de comercialização de energia eléctrica, comparativamente com as transacções efectuadas bilateralmente ou através dos *brokers* existentes [Gomes, 2007].

Após a criação da bolsa de energia entre a Inglaterra e o País de Gales, outros países europeus seguiram o processo de reestruturação dos sectores eléctricos, como por exemplo a Noruega. Em 1991, a Noruega colocou em funcionamento uma bolsa de energia, que foi estendida à Suécia em 1996, dando origem à *NordPool*. Actualmente, o *NordPool* também inclui a Finlândia e a Dinamarca. De realçar que o *NordPool* é o primeiro e o maior mercado multinacional de energia eléctrica do mundo.

Em 1997 em Espanha, foi aprovada a *Ley del Sector Eléctric* pelas Cortes, para vigorar a partir de Janeiro de 1998. Esta lei consagrou uma profunda reestruturação, ordenando: (i) a redução da intervenção estatal, (ii) a diferenciação entre actividades reguladas (transporte, distribuição e operação do sistema) e não reguladas (produção e comercialização) e a sua separação jurídica, (iii) a criação de um mercado grossista, (iv) a liberdade de escolha dos consumidores, e (v) o acesso livre a terceiros [Paiva, 2007]. O modelo do sector eléctrico espanhol compreende a existência de dois sistemas: o sistema regulado (ou à tarifa) e o sistema liberalizado. No sistema regulado, os consumidores adquirem electricidade aos distribuidores sob o regime de tarifas reguladas. As empresas de distribuição adquirem electricidade no mercado grossista, sendo as actividades de transporte e de distribuição exercidas em regime regulado. No sistema liberalizado, os consumidores qualificados e os comercializadores estabelecem bilateralmente as condições para a transacção de electricidade entre si [Gomes, 2007].

Na União Europeia, a Directiva 96/92/CE, sobre o mercado interno de electricidade, foi um passo decisivo na direcção da reforma do sector eléctrico. Esta directiva foi adoptada em 1996 e implementada em Fevereiro de 1999. Nela são estabelecidas as regras comuns relativas à produção, transporte e distribuição de electricidade, à organização e funcionamento do sector eléctrico, ao acesso ao mercado, assim como os critérios e mecanismos aplicáveis aos concursos, à concessão de autorizações e à exploração das redes [Sousa, 2005].

Em 2003, o Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia decidiram revogar a Directiva 96/92/CE pela Directiva 2003/54/CE, de 26 de Junho de 2003, que define as regras comuns à criação do mercado interno da electricidade da União Europeia, e estipula que os consumidores não domésticos podem escolher livremente o seu fornecedor de electricidade (desde de 1 de Julho de 2004). Todos os consumidores, incluindo os domésticos, podem também fazê-lo desde 1 de Julho de 2007, significando que durante a segunda metade da década o número de potenciais consumidores que podem trocar de fornecedor de energia eléctrica cresceu substancialmente [Ramos, 2006].

A 14 de Agosto de 2009, o Parlamento Europeu e o Conselho publicaram a Directiva 2009/72/CE, de 13 de Junho, que estabelece regras comuns para o mercado interno da

electricidade, e que revoga a Directiva 2003/54/CE. A Directiva 2009/72/CE está integrada no Terceiro Pacote Legislativo - Mercado Interno de Energia da União Europeia, aprovado a 13 de Julho de 2009, e pretende estabelecer regras comuns para a produção, transporte, distribuição e comercialização de electricidade, bem como regras para a protecção dos consumidores, a fim de melhorar e integrar mercados da energia competitivos na UE. Esta directiva define as normas relativas à organização e ao funcionamento do sector da electricidade, incluindo o acesso aberto ao mercado, bem como os critérios e procedimentos aplicáveis aos concursos, à concessão de autorizações, e à exploração das redes. A Directiva define ainda as obrigações de serviço universal e os direitos dos consumidores de electricidade, e clarifica as obrigações em matéria de concorrência [Directiva 2009/72/CE, 2009].

A Tabela 2.1 apresenta a evolução da legislação europeia e algumas etapas que permitiram a liberalização do sector de energia eléctrica português e espanhol.

	Europa	Espanha	Portugal
1997	Aprovação da Directiva 96/92/CE (Definição do Mercado Interno)		
1998	Adopção da Directiva pelos Estados-Membros		1ª Etapa - 28% de liberalização do consumo
1999	2ª, 3ª, 4ª e 5ª Etapa 43 % de liberalização de consumo		
2000	6ª Etapa - 52% de liberalização do consumo		1ª Etapa - 30% de liberalização do consumo
2003	Aprovação da Directiva 2003/54/CE (Regras comuns para o mercado interno)	Mercado liberalizado a 100%	2ª Etapa - 35% de liberalização do consumo
2004	Liberalização de todos os clientes não domésticos		
2006	Mercado liberalizado a 100%		
2007	Objectivo Europeu – Mercado liberalizado até 1 de Julho de 2007		
2009	3º Pacote Energético Europeu + Directiva 2009/72/CE (revogou a Directiva 2003/54/CE)		
2011			

Tabela 2.1 – Evolução cronológica da liberalização do sector eléctrico europeu, português e espanhol. Adaptado de [Simões, 2011].

2.1.4 Modelos de Mercado

2.1.4.1 Modelo em Bolsa (*Pool*)

No modelo em bolsa (*Pool*), baseado no mercado diário (*spot*) ou *day-ahead market* (nomenclatura anglo-saxónica), os participantes do mercado submetem ofertas de compra e venda de energia a um operador de mercado, cuja função é coordenar e gerir as diferentes transacções entre participantes. Estas ofertas são discriminadas para as 24 horas do dia seguinte, geralmente com um intervalo de uma hora ou trinta minutos, indicando-se o preço e o volume de energia que se pretende transaccionar. Este tipo de mercado é gerido por uma entidade independente, normalmente o operador de mercado, que tem como funções garantir o funcionamento normal do mercado, garantido transparência nas transacções, cumprimento de todas as regras e definição do preço da energia eléctrica.

No mercado *spot*, os vendedores competem pelo fornecimento de energia global, e não para conseguir determinados clientes. Se um vendedor do mercado licitar valores demasiado elevados, ele não será capaz de vender. Por outro lado, os compradores competem para comprar energia, e se as suas licitações forem demasiado baixas, não conseguirão comprar energia. Neste tipo de mercado, os produtores com preços mais baixos são geralmente recompensados [Shahidehpour et al., 2002].

Os participantes do mercado têm a responsabilidade de manter o equilíbrio do mercado, o que significa que devem consumir ou produzir de acordo com as suas propostas. Por exemplo, se uma empresa produtora produzir menos do que declarar, então provavelmente terá que comprar energia em mercados externos a preços menos competitivos (mais elevados).

Depois de definido um despacho provisório para o dia seguinte resultante das transacções do mercado, é necessário verificar a viabilidade técnica desse despacho, garantir que as restrições da rede de transporte não são superadas, e que não existem congestionamentos. Para isso, o operador de mercado envia ao operador de sistema toda a informação necessária, como por exemplo os volumes de energia e os barramentos de injeção e absorção de energia (resultante das transacções). O operador de sistema analisa o despacho, e caso seja garantida a sua viabilidade, transmite informação aos produtores sobre os valores obtidos, contrata os níveis necessários de serviços auxiliares (correspondente, por exemplo, à produção de energia reactiva, controlo de tensão, etc.), e comunica os valores obtidos do trânsito de potência nas redes, para cada intervalo de negociação, às empresas proprietárias das redes de transporte [Ramos, 2006]. A Figura 2.4 apresenta, de forma esquemática, o funcionamento de um mercado de energia eléctrica baseado no modelo *Pool*.

Dentro do modelo *Pool* surgiram duas variantes: o *Pool* Simétrico e o *Pool* Assimétrico. Na variante *Pool* Simétrico, o operador de mercado recebe as ofertas de venda e de compra para cada período horário do dia seguinte. O preço a que os produtores vão ser remunerados, e que os consumidores irão pagar, será determinado em função das ofertas de venda mais

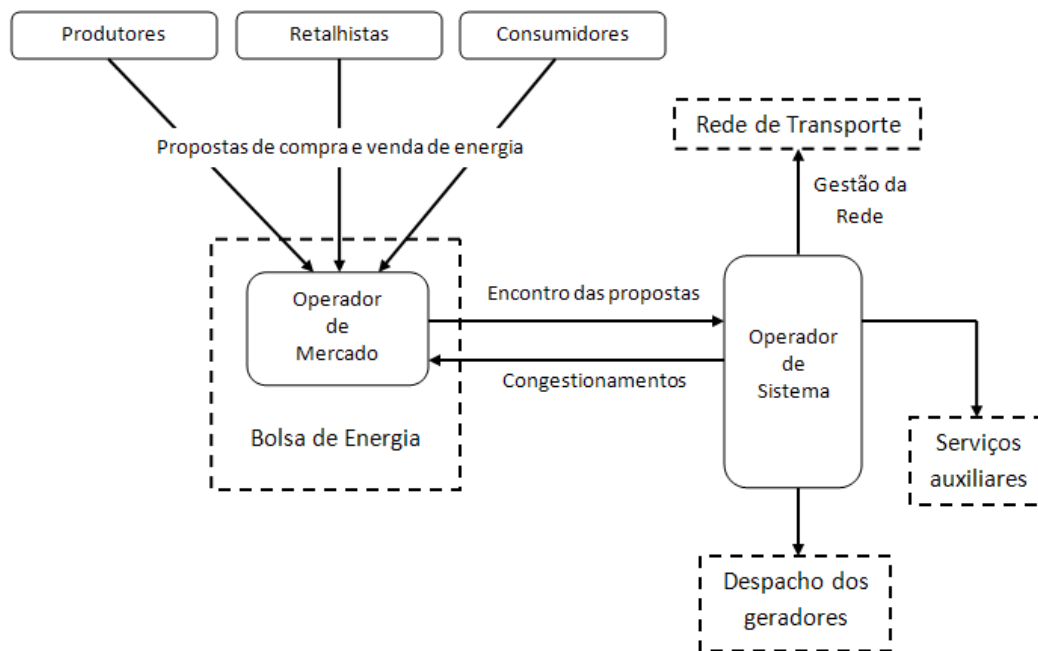


Figura 2.4 — Estrutura e funcionamento do mercado de energia baseado no modelo Pool.

económicas e das ofertas de compra mais vantajosas, podendo esse preço ser alterado em situações em que ocorram congestionamentos. Na variante *Pool* Assimétrico, de acordo com a carga prevista e as ofertas de venda de energia, o operador de mercado determina o despacho provisório sem levar em consideração as restrições técnicas do sistema. O preço a que os produtores irão ser remunerados é determinado em função das ofertas mais económicas para satisfazer a carga prevista, estando também sujeito a alterações no caso de ocorrerem congestionamentos [Azevedo, 2007].

Mercado *Pool* Simétrico

O mercado *Pool* Simétrico é o tipo de mercado mais comum utilizado em mercados *spot*, pois possibilita a proposta de ofertas de venda e de compra. Em função das ofertas de venda e de compra efectuadas, o operador de mercado, para cada período de programação – uma hora ou trinta minutos – ordena por ordem crescente do preço as ofertas de venda e por ordem decrescente (também do preço) as ofertas de compra. O processo de ordenamento das ofertas está representado na Figura 2.5, onde cada segmento das curvas corresponde a uma oferta de venda ou de compra [Azevedo, 2007].

Neste tipo de mercado, o preço de fecho é normalmente determinado pela “intersecção” da curva das ofertas de compra com a curva das ofertas de venda, por forma a estabelecer um equilíbrio entre a oferta e a procura. A Figura 2.5 ilustra como se determina o preço de mercado e a quantidade de energia negociada.

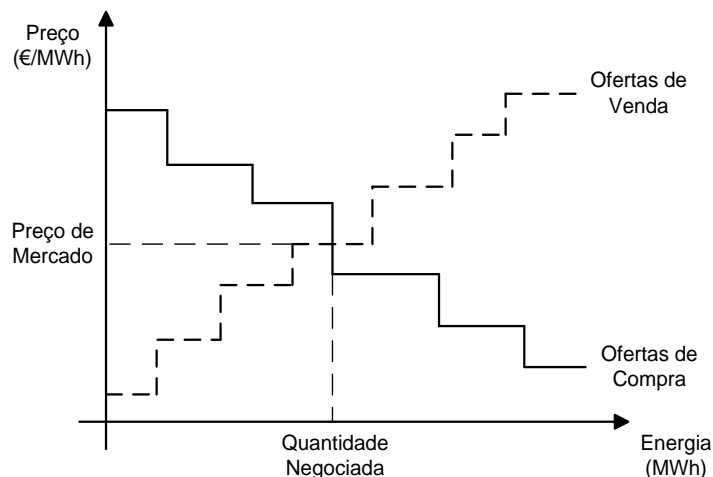


Figura 2.5 — Curvas de oferta e procura num mercado Pool Simétrico.

Mercado *Pool* Assimétrico

No Mercado *Pool* Assimétrico, o operador de mercado recebe todas as ofertas de venda (não são submetidas ofertas de compra), 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 2.6 ilustra este processo [Pereira, 2004].

Neste tipo de mercado, considera-se que a procura (carga prevista) é inelástica, sendo por isso capaz de pagar qualquer preço estabelecido pelo mercado. Na Figura 2.6 a carga prevista é representada pela recta vertical a traço interrompido.

Este modelo assemelha-se ao modelo monopolista tradicional e os preços finais são fortemente influenciados pelas ofertas de venda, pelo nível de procura, e pela ocorrência ou não de saídas de serviço dos geradores [Azevedo, 2007].

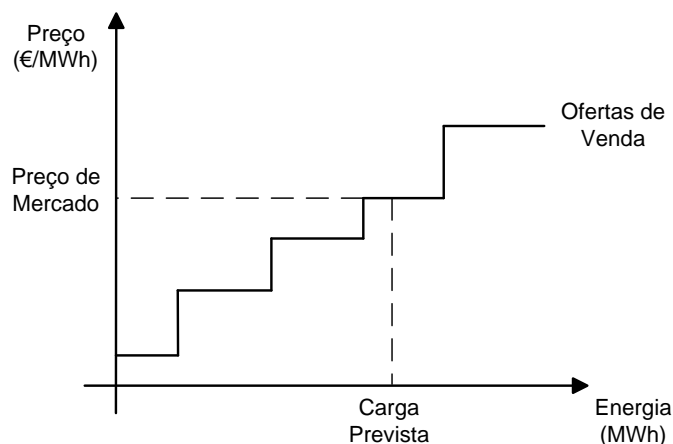


Figura 2.6 — Curva de oferta num mercado Pool Assimétrico.

2.1.4.2 Modelo de Contratos Bilaterais Físicos

O modelo de contratos bilaterais físicos permite que as empresas produtoras, distribuidoras, consumidores elegíveis e comercializadores negociem de forma directa e livre os preços e as condições dos contratos de aquisição de energia. As condições acordadas nos contratos (os volumes de energia, a data e o local da entrega dos volumes ao comprador) devem ter em consideração as limitações técnicas da rede eléctrica e a sua segurança. Em particular, para garantir que a segurança da rede não seja posta em causa, os contratos têm que ser comunicados à entidade responsável pela rede de transporte, ou seja, ao operador de sistema.

Este modelo tem a vantagem de permitir uma maior segurança em relação à estabilidade dos preços, pois possibilita que se mantenha o mesmo preço de energia durante longos períodos de tempo (6 meses ou mais), evitando a exposição à volatilidade dos preços de mercado. No entanto, apresenta algumas desvantagens, como por exemplo, não contribuir para um despacho optimizado.

Kirschen e Strbac (2004) apresentam dois tipos essenciais de contratos bilaterais:

Contratos de Longo Prazo: Os termos destes contratos são flexíveis, uma vez que são negociados em privado para satisfazer as necessidades e os objectivos de ambas as partes (vendedor e comprador). Por norma, envolvem a venda de grandes quantidades de energia (centenas ou milhares de MWh) durante longos períodos de tempo (vários meses ou vários anos). Os grandes custos de transacção associados à negociação deste tipo de contratos faz com que apenas valha a pena fazê-los quando as partes querem comprar ou vender grandes quantidades de energia.

Contratos "Over The Counter" (OTC): Estas transacções envolvem pequenas quantidades de energia para serem entregues de acordo com um perfil padrão, ou seja, uma definição padronizada da quantidade de energia a entregar durante diferentes períodos do dia e da semana. Este tipo de contrato tem custos de transacção mais baixos e é usado por produtores e consumidores para corrigir a sua posição quando o tempo de entrega se aproxima. Além disso, este tipo de contrato tem a desvantagem de ter um risco de crédito associado, pois não existindo um organismo que supervisione as operações de compra e venda, não existem garantias de que as condições dos contratos sejam cumpridas.

Os contratos bilaterais entre um (só) centro electroprodutor e um cliente não fazem sentido, pois significam estar fisicamente no sistema em rede e ter um comportamento de sistema isolado. Um comercializador só garante aos seus clientes um funcionamento com elevada garantia de fornecimento, se tiver à sua disposição uma produção suficiente para situações severas: avaria de equipamentos, ou seca prolongada, e se for possível estabelecer convenientemente a manutenção programada [Santana, 2004].

2.1.4.3 Modelo Híbrido

Este tipo de modelo é uma combinação do modelo *Pool* e do modelo de contratos bilaterais físicos, sendo um modelo de mercado misto, em que a participação em bolsa não é obrigatória. O modelo híbrido aumenta as opções de escolha de compra de energia dos agentes consumidores, permitindo que estes façam escolhas que se adaptem melhor às suas necessidades individuais. Os consumidores podem optar por adquirir a energia que pretendem na bolsa pagando o preço estabelecido por mercado, ou negociarem a energia directamente com fornecedores e efectuarem contratos bilaterais físicos, possibilitando assim a protecção dos compradores à volatilidade dos preços no mercado *Pool*.

Neste tipo de modelo, tal como no modelo *Pool*, existe um operador de mercado responsável pelas transacções na bolsa de energia eléctrica, e um operador de sistema que além de ser responsável pela verificação da viabilidade técnica do despacho provisório resultante da bolsa de energia, também é responsável pela verificação da viabilidade dos acordos realizados através de contratos bilaterais físicos.

O operador de sistema recebe a informação das transacções da bolsa de energia e dos contractos bilaterais físicos estabelecidos. Posteriormente analisa as solicitações de utilização da rede, e verifica a possibilidade de existência de congestionamentos, tendo em consideração as restrições de capacidade de transporte das redes. Se porventura existirem situações de

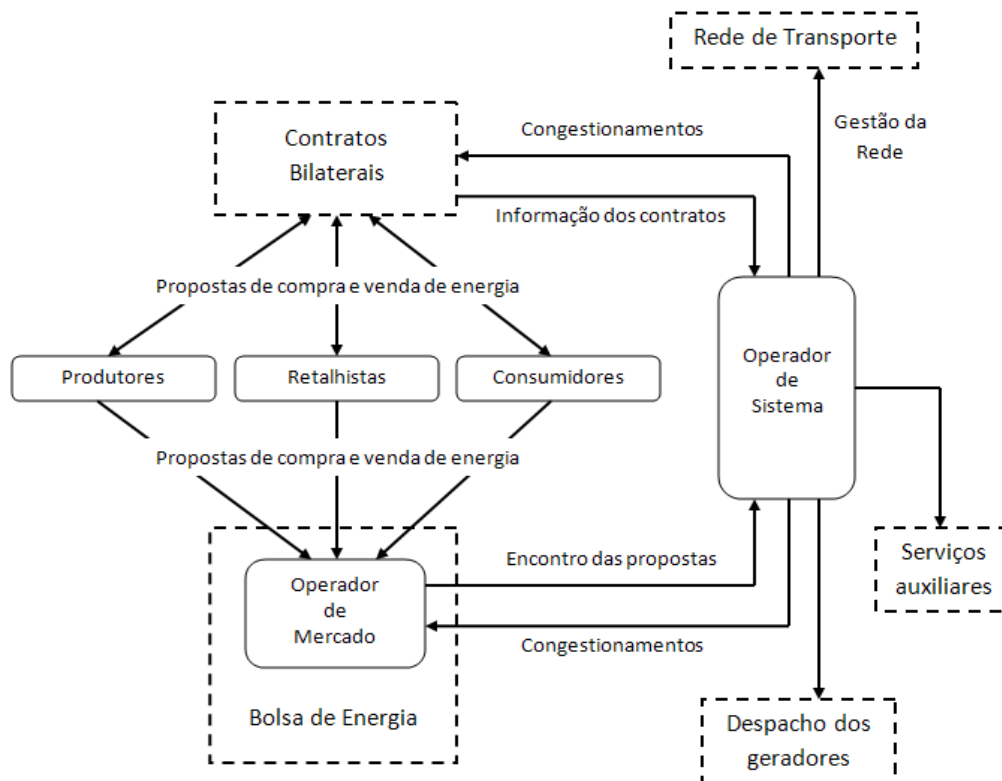


Figura 2.7 — Estrutura e funcionamento do mercado de energia baseado no modelo Híbrido.

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 [Praça, 2004]. O funcionamento do mercado baseado no modelo híbrido está representado de forma esquemática na Figura 2.7.

Actualmente, este é o modelo mais usual na generalidade dos países que liberalizaram o sector eléctrico, como é o caso de Portugal e Espanha (que constituem o MIBEL), e dos países que integram a *NordPool*.

2.1.5 MIBEL - Mercado Ibérico de Energia Eléctrica

A integração do mercado eléctrico português com o mercado eléctrico espanhol ficou totalmente concluída em 2007, dando origem ao Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL). Esta integração não tem qualquer distinção operacional de fronteiras. No MIBEL há apenas uma bolsa Ibérica de energia, para a compra e venda de energia eléctrica, por parte das empresas de ambos os países.

No MIBEL funcionam um conjunto de transacções derivadas da participação dos agentes do mercado nas sessões dos mercados diário e intradiário, mercado a prazo e da aplicação dos procedimentos de operação técnica do sistema. Os contratos bilaterais físicos realizados por vendedores e compradores são integrados no mercado de produção, uma vez finalizado o mercado diário [OMIP, 2011].

Os produtores, autoprodutores, agentes externos ou entidades não residentes, comercializadores e consumidores qualificados, podem ser agentes do Mercado Ibérico. Com a entrada em vigor do Acordo Internacional assinado em Santiago de Compostela a 1 de Outubro de 2004, as entidades autorizadas em Portugal e Espanha podem actuar neste mercado, beneficiando de um reconhecimento automático e deixando de ser consideradas agentes externos, pelo que lhes serão garantidos os mesmos direitos e obrigações. Por outro lado, neste acordo também são estabelecidas as regras gerais de funcionamento do mercado [Gomes, 2007].

Existem dois pólos, o português (OMIP), responsável pelo mercado a prazo de energia eléctrica, em que a energia contratada pelo comprador é entregue posteriormente ao dia seguinte da contratação, e o espanhol (OMEL), responsável pela negociação diária e intradiária de energia (em que a energia contratada pelo comprador é entregue no próprio dia da contratação ou no dia seguinte). O OMIP e o OMEL deverão ser futuramente integrados, dando origem ao OMI, ou seja ao operador de mercado único.

O Acordo de Santiago de Compostela, de 1 de Outubro de 2004, determinou o quadro jurídico caracterizador do actual modelo de funcionamento do MIBEL, prevê que o MIBEL seja formado pelo conjunto dos mercados organizados e não organizados, nos quais se realizam

transacções ou contratos de energia eléctrica e se negociam instrumentos financeiros que têm como referência essa mesma energia. Os mercados que constituem o MIBEL podem ser resumidos da seguinte forma [CMVM, 2009]:

Mercados organizados:

- Mercados a prazo: transacções referentes a blocos de energia com entrega posterior ao dia seguinte da contratação, de liquidação por entrega física ou financeira;
- Mercados diários: transacções referentes a blocos de energia com entrega no dia seguinte ao da contratação, de liquidação necessariamente por entrega física (mercado *spot*);
- Mercado intradiário: transacções de liquidação necessariamente por entrega física (mercado *spot*).

Mercados não organizados: compostos por contratos bilaterais entre as entidades do MIBEL, de liquidação tanto por entrega física como financeira.

A figura 2.8 apresenta de forma esquemática um resumo do modelo de mercado do MIBEL.



Figura 2.8 — Modelo de Mercado no MIBEL [Pedras, 2006].

Mercado a prazo

O mercado a prazo é um mercado organizado que oferece instrumentos de gestão de risco sob a forma de derivados. Os instrumentos transaccionados no OMIP referem-se a contratos de compra e venda de energia para um determinado período futuro (semana, mês, trimestre e ano), de acordo com regras específicas deste mercado. O tipo de instrumentos

transaccionados varia com as necessidades de gestão de risco e de troca de electricidade pelos diferentes agentes.

No OMIP, os produtos mais transaccionados, e por isso mais comuns, são os Contratos Futuro. Para actuação directa no mercado é necessária a obtenção da qualidade de Membro Negociador, atribuída pelo OMIP, após a qual os membros podem actuar exclusivamente por conta própria, por conta de terceiros, ou por conta própria e de terceiros [CMVM, 2009]

Este tipo de mercado permite a diminuição das barreiras apresentadas a novos agentes que pretendam entrar no mercado de energia, visto que permite o acesso a mecanismos de cobertura de risco. Ou seja, permitem que os produtores possam cobrir os riscos associados a custos de operação, e também contribuem para a garantia de abastecimento individual do consumidor que pode assegurar quantidades de energia fornecida [Martins, 2009].

Mercado diário

O mercado diário do MIBEL é a plataforma onde se transacciona electricidade para entrega no dia seguinte ao da negociação. Este mercado define preços para cada uma das 24 horas de cada dia e para cada um dos 365 (ou 366) dias de cada ano. Na plataforma de mercado diário em que se integra Portugal, gerida pelo OMEL, a hora de negociação é determinada pela hora legal espanhola. Este mercado funciona através do cruzamento de ofertas — de compra e de venda — por parte dos diversos agentes registados para actuar naquele mercado, indicando cada oferta o dia e a hora a que se reporta, o preço, e a quantidade de energia correspondente. O preço de mercado é encontrado através de um processo em que se ordenam de forma crescente, em preço, as ofertas de venda (curva de oferta) e de forma decrescente, também em preço, as ofertas de compra (curva de procura) de electricidade para uma mesma hora. O preço de mercado (graficamente corresponde ao cruzamento das curvas de oferta e de procura) é o menor dos preços que garanta que a oferta satisfaz a procura [ERSE, 2011].

Mercado intradiário ou mercado de ajustes

Os mercados intradiários são utilizados para que os agentes que participam nos mercados diários, ou que estabeleçam contratos bilaterais, efectuem ajustes de necessidade de energia às aquisições que estabeleceram anteriormente. No caso dos compradores no mercado diário, para poderem participar no mercado intradiário, têm de ter participado na correspondente sessão do mercado diário ou na execução de um contrato bilateral físico. No caso dos produtores, estes têm de ter participado na correspondente sessão do mercado diário ou na execução de um contrato bilateral físico, ou ter estado indisponível para a sua participação no mercado diário e ter ficado disponível posteriormente [OMEL, 2011].

Este tipo de mercado existe para gerir os desvios a curto prazo previstos para os programas de contrato entre a produção de energia eléctrica e o respectivo consumo da mesma. O mercado intradiário é também um mecanismo necessário, devido a eventuais

congestionamentos da rede eléctrica, ou eventuais avarias de equipamentos presentes na rede. Estes e outros eventos que possam ocorrer provocam a necessidade de correcções e compensações nos programas diários contratuais definidos, o que torna este mercado essencial e necessário para o bom funcionamento do sistema eléctrico [Martins, 2009].

A concretização do MIBEL permitiu que qualquer consumidor no espaço Ibérico adquira energia eléctrica em regime de livre concorrência, a qualquer produtor ou comercializador que actue em Portugal ou em Espanha.

Os principais objectivos do MIBEL são os seguintes [OMIP, 2011]:

- Beneficiar os consumidores de electricidade dos dois países, através do processo de integração dos respectivos sistemas eléctricos;
- Estruturar o funcionamento do mercado com base nos princípios da transparência, livre concorrência, objectividade, liquidez, auto-financiamento e auto-organização;
- Favorecer o desenvolvimento do mercado de electricidade de ambos os países, com a existência de uma metodologia única e integrada, para toda a península ibérica, de definição dos preços de referência;
- Permitir a todos os participantes o livre acesso ao mercado, em condições de igualdade de direitos e obrigações, transparência e objectividade;
- Favorecer a eficiência económica das empresas do sector eléctrico, promovendo a livre concorrência entre as mesmas.

A Figura 2.9 apresenta o modelo actual de funcionamento do MIBEL, sendo indicados os principais pressupostos necessários para a sua implementação e desenvolvimento.

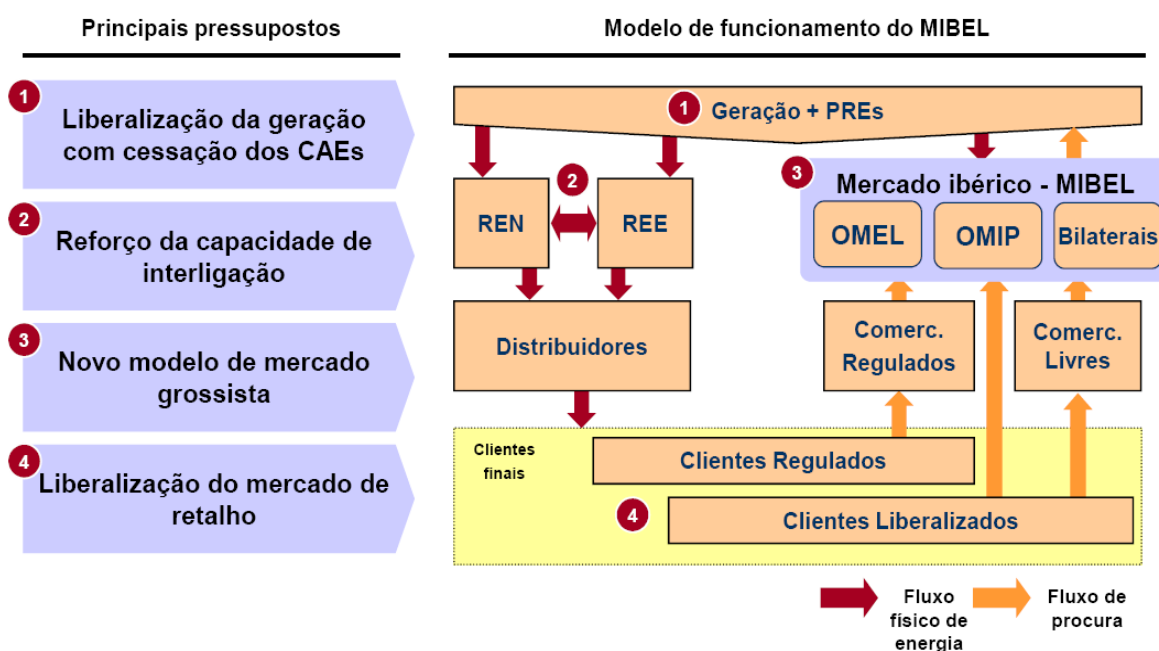


Figura 2.9 — Modelo de funcionamento do MIBEL [EDP(a), 2011].

2.1.5.1 Operadores de Mercado OMEL e OMIP

OMEL

O OMEL é o responsável pela gestão do mercado ibérico diário (*spot*) de electricidade. Neste mercado realizam-se as transacções decorrentes da participação dos agentes nas sessões do mercado diário e do mercado intradiário que agregam, numa lógica de *market splitting* (descrito na secção 2.1.5.2), as zonas espanhola e portuguesa do MIBEL. A negociação no mercado diário efectua-se com base num leilão, com liquidação da energia para todas as horas do dia seguinte. Deste modo forma-se, um preço único para Espanha e para Portugal (para cada hora do dia seguinte). Estes preços podem ser distintos, nomeadamente quando, para uma dada hora, a interligação está congestionada, ou seja não é suficiente para assegurar todos os trânsitos de electricidade entre as duas regiões. Complementarmente, existem várias sessões do mercado intradiário, subsequentes ao leilão do mercado diário, em que é possível aos agentes transaccionar energia eléctrica para as várias horas do dia coberto por aquele mercado. O modo de negociação é igualmente por leilão. [OMIP, 2011].

OMIP

O OMIP é a entidade gestora responsável pela organização da divisão portuguesa do MIBEL, assegurando a gestão do mercado de derivados do MIBEL, em conjunto com a OMIClear (empresa de mercados de energia totalmente detida pelo OMIP), que desempenha o papel de câmara de compensação e contraparte central. Assim, a gestão do mercado de derivados do MIBEL é realizada por duas entidades diferentes:

- Pelo OMIP, que assegura as funções de negociação;
- Por uma câmara de compensação, que assume o papel de contraparte central no mercado (OMIClear).

Como entidade gestora responsável pela plataforma de negociação do mercado de derivativos, a OMIP realiza as tarefas necessárias para o funcionamento regular do mercado, como a admissão de participantes, a supervisão do comportamento dos participantes do mercado, a implementação de poderes disciplinares em relação aos seus membros, o apoio do registo de contratos bilaterais (OTC - *Over the Counter*) e a definição e a listagem dos contratos. Além disso, o OMIP também é responsável pela publicação de informações, o que é relevante para os participantes e o público em geral, e para o normal funcionamento do mercado de derivativos [Simão, 2009].

O OMIClear é responsável, entre outras, pela definição das regras que regem a sua actividade, e pela admissão, suspensão e exclusão dos membros compensadores. Além disso, assegura o registo de posições, assume a responsabilidade pela compensação, gestão de risco e de garantias, e a determinação das margens exigíveis e liquidação financeira das operações. Assume ainda a posição de contraparte central^[1] de operações, realizadas em

mercado ou fora de mercado (mas registadas no mercado), e assegura o regular funcionamento da plataforma de compensação. A realização de negócios em mercado^[2] implica o registo das operações para a plataforma de compensação, sendo a liquidação e a compensação destas asseguradas pelo OMIClear, de acordo com as regras estabelecidas por esta entidade para o efeito [CMVM, 2009].

^[1] Ou seja, assume-se como compradora comum face a todos os vendedores e como vendedora comum face a todos os compradores, garantindo aos membros compensadores o bom cumprimento de todas as obrigações inerentes às posições assumidas, desde o momento em que as mesmas são registadas até à sua liquidação.

^[2] E dos negócios realizados fora de mercado, vulgo OTC, uma vez que está prevista a possibilidade de registo destes para efeitos de compensação.

2.1.5.2 Interligação entre Portugal e Espanha

Para que o MIBEL seja um Mercado Ibérico com uma integração plena entre Portugal e Espanha é necessário que as redes eléctricas dos dois países estejam interligadas, para permitir o transporte da energia transaccionada nos mercados organizados e através dos contratos bilaterais. A capacidade de transporte das linhas de interligação está limitada por restrições técnicas, que naturalmente precisam de ser respeitadas. O operador de sistema é a entidade responsável pela gestão técnica das restrições da rede de transporte e tem o dever de organizar o despacho de forma a respeitar essas restrições. No entanto, há situações em que a capacidade das linhas de interligação não permite transportar todo o fluxo de energia resultante das transacções pretendidas pelos agentes do mercado. Esta falta de capacidade das linhas é designada por congestionamento. Em termos gerais, o congestionamento pode ser devido à capacidade insuficiente das linhas de interligação ou como a limitações ao nível interno de cada uma das redes nacionais.

Segundo a proposta de mecanismos de gestão conjunta da interligação Espanha – Portugal, a responsabilidade de gestão será dos dois operadores de sistema já existentes, a REN (Rede Eléctrica Portuguesa) e a REE (*Red Electrica de España*). O modelo previsto consiste essencialmente na implementação de um mecanismo de separação de mercados (*market splitting*) no horizonte diário, de forma a permitir a melhor utilização possível da capacidade disponível, em segurança [Ferreira, 2007].

O *market splitting* é um mecanismo de leilão da capacidade das linhas de interligação entre dois sistemas, implícito nas licitações que os agentes efectuem no mercado diário, e pressupõe a existência de um mercado conjunto gerido por um único operador. Quando a capacidade de interligação entre os dois sistemas é superior ao trânsito de energia que resulta do fecho de mercado, a interligação não fica congestionada e existe um preço único de mercado igual para os dois sistemas. No entanto, quando a capacidade de interligação é

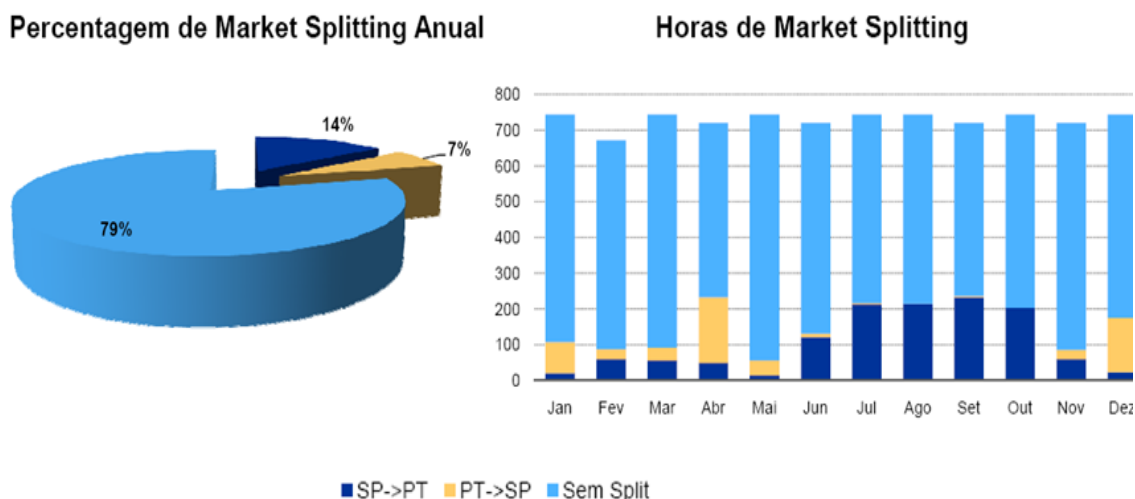


Figura 2.10 – Market splitting no MIBEL em 2010. Adaptado de [EDP(a), 2011].

inferior ao trânsito de energia, a interligação fica congestionada no seu limite, passando a existir a divisão do mercado em duas zonas distintas, a zona portuguesa e a zona espanhola, com preços diferentes para as horas de congestionamento. Nesta situação, o preço é superior no mercado importador e inferior no mercado exportador.

A Figura 2.10 apresenta a percentagem e as horas de *market splitting* no MIBEL em 2010. Analisando a figura verifica-se que em 2010 o *market splitting* ocorreu durante 21 % do total de horas anuais, 14 % no sentido de Espanha para Portugal e 7 % no sentido de Portugal para Espanha. Verifica-se também que os meses de Janeiro, Abril e Dezembro foram os meses com maior número de horas de *market splitting* no sentido de Portugal para Espanha.

2.1.6 Mercado Português de Energia Eléctrica

Em Portugal, a partir de 1975, iniciou-se um processo de nacionalização das empresas concessionárias do sector eléctrico existentes, criando-se três empresas públicas, denominadas de EDP - Electricidade de Portugal, responsável pela operação em Portugal continental, EDA – Electricidade dos Açores, responsável pela operação nos Açores e a EEM – Empresa de Electricidade da Madeira, responsável pela operação na Madeira. Estas empresas detinham todas as actividades do sector eléctrico, desde a produção até à comercialização. Além disso, estas empresas operavam em regime de serviço público, sendo caracterizadas como sendo monopólios naturais, não existindo qualquer concorrência neste sector.

No final da década de oitenta, as actividades de produção e distribuição de energia eléctrica foram abertas à iniciativa privada, através do Decreto-Lei n.º 449/88. A partir daí, o sector eléctrico sofreu profundas mudanças. A reestruturação do sector evoluiu com o estabelecimento dos princípios gerais do regime jurídico das actividades da produção, transporte e distribuição de electricidade, mediante a publicação do Decreto-Lei n.º 99/91 [Ramos, 2006].

Em 1995, o sistema eléctrico português teve uma primeira reforma, com o pacote legislativo (Decretos-Leis nº182/95 a 188/95 de 27 de Julho) que pretendeu separar juridicamente o sistema regulado, denominado por Sistema Eléctrico de Serviço Público (SEP), do sistema liberalizado, denominado por Sistema Eléctrico Não Vinculado (SENV), constituindo-se assim as bases de organização do Sistema Eléctrico Nacional (SEN). No entanto, devido à Directiva Comunitária 96/92/CE de 19 de Dezembro de 1996, que definiu regras comuns para o mercado eléctrico da Comunidade Europeia, foi necessário rever a legislação em Portugal, tendo sido alterada através da publicação do Decreto-Lei n.º56/97, de 14 de Março. Em 2007, o mercado eléctrico português e o mercado eléctrico espanhol (liberalizado desde 1998) foram integrados conjuntamente, dando origem ao Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL).

Actualmente, o Sistema Eléctrico Nacional (SEN) divide-se em cinco actividades principais: produção, transporte, distribuição, comercialização e operação dos mercados de electricidade.

Produção

A produção em Portugal é maioritariamente de tecnologia térmica. No entanto, nos últimos anos tem havido um grande investimento na produção através de energias renováveis e de co-geração. Existem dois regimes de produção: produção em regime ordinário e produção em regime especial.

- Produção em regime ordinário: inclui a produção de energia eléctrica a partir de fontes tradicionais não renováveis (carvão, gás natural, gasóleo, fuel) e em grandes centros electroprodutores hídricos. Neste tipo de produção é necessário uma licença para produzir e os produtores podem vender a energia através de contratos bilaterais ou em mercados organizados tanto a comercializadores como a consumidores finais;
- Produção em regime especial: inclui a produção de energia eléctrica a partir da co-geração e das energias renováveis (eólica, mini-hídrica, solar, co-geração, biomassa). Os produtores deste regime têm o direito de vender energia eléctrica com uma tarifa especial, aos comercializadores de último recurso.

Os principais produtores existentes em Portugal são a EDP Produção, a Turbogás e a Tejo Energia. O sector da produção está dividido em dois tipos de mercado, o mercado livre e o mercado regulado.

Transporte

No sector do transporte existe um único operador de sistema. Em particular, o Estado Português atribuiu a concessão exclusiva da rede de transporte em regime de serviço público à REN - Rede Eléctrica Nacional. Este sector funciona em regime de monopólio regulado. A REN tem como funções principais a construção, operação, planeamento, gestão e manutenção da Rede Nacional de Transporte de electricidade.

Distribuição

O sector da distribuição, tal como o do transporte, é operado em regime de exclusividade, através de uma concessão atribuída pelo Estado Português à empresa EDP - Distribuição. Esta concessão apenas inclui a actividade de distribuição feita em alta tensão (AT) e média tensão (MT). Nos casos de distribuição em baixa tensão (BT), os contratos de concessão são estabelecidos entre os municípios e os distribuidores, que actualmente pertencem à EDP Distribuição.

Comercialização

Antes do processo de liberalização do sector eléctrico, a actividade de comercialização era normalmente assumida pelos distribuidores. Após a liberalização, e com a passagem deste sector a um regime de mercado livre, novos agentes assumiram esta actividade, o que permitiu potenciar a competitividade e a criação de mais valias para os consumidores, como um aumento da qualidade de serviço e preços de compra mais baixos. Actualmente, os comercializadores actuam de forma livre na compra e venda de energia, mas estão sujeitos a pagamentos de tarifas para poderem ter acesso às redes de transporte e distribuição. A comercialização de energia eléctrica pode ser feita de duas formas: no mercado livre, através dos comercializadores livres, ou no mercado regulado, através do comercializador de último recurso.

Mercado de Energia Eléctrica

Em Portugal, os mercados organizados de electricidade operam num regime livre e estão sujeitos a autorizações concedidas conjuntamente pelo ministro das Finanças e pelo ministro responsável pelo sector energético. A operação do mercado de electricidade deve ser integrada no âmbito do funcionamento de outros mercados organizados de electricidade estabelecidos entre o Estado Português e outros Estados-membros da UE. Os produtores que operem sob o regime ordinário e os comercializadores, entre outros, podem tornar-se membros do mercado [REN, 2011].

A Tabela 2.2 apresenta um resumo da estrutura actual do sistema eléctrico português, com a indicação dos tipos de mercado presentes em cada actividade.

Regulação económica

A regulação económica é uma das formas mais utilizadas para lidar com situações de monopólios naturais. Esta solução consiste essencialmente na existência de uma empresa monopolista a actuar no mercado, e de uma entidade reguladora que estipula um conjunto de regras que tentam evitar os efeitos negativos da existência de uma única empresa no mercado. Estas regras consistem normalmente na fixação de tarifas, critérios de qualidade, definição das regras de entrada no mercado e outros mecanismos [Sousa, 2005].

Produção		Transporte	Distribuição	Comercialização	
Mercado Livre	Mercado Regulado	Monopólio Regulado	Monopólio Regulado	Mercado Livre	Mercado Regulado
Produção Livre	Produção em Regime Especial	Activos geridos e detidos integralmente pela REN	Remuneração da Base de Activos, regulada Standards para a Qualidade de Serviço	100 % do consumo já liberalizado Livre concorrência entre comercializadores	Comercializador de último recurso (só clientes com P < 41,4 kW) Proveitos Regulados

Tabela 2.2 — Estrutura actual do sistema eléctrico português. Adaptado de [Simões, 2011].

Com o início da liberalização do sector energético em Portugal, houve a necessidade de criar uma entidade reguladora independente do estado e das empresas do sector eléctrico, que fosse responsável por garantir o cumprimento das regras e regulamentos existentes neste sector. Por esta razão, em 1995, foi criada a Entidade Reguladora do Sector Eléctrico (ERSE), que em 1997 teve o seu nome alterado para Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.

Em Portugal, esta entidade ficou responsável pelo sector eléctrico e pelo sector do gás natural. Actualmente, a ERSE é responsável pela supervisão do mercado regulado, dos monopólios regulados, das tarifas de uso das redes e das restantes actividades reguladas, e desempenha ainda outras funções importantes (como por exemplo, assegurar a justiça e transparência no sector energético, garantir o cumprimento da regulamentação, promover a competitividade e a qualidade de serviço, e estimular a utilização eficiente da energia).

2.1.7 Tarifas e Preços

O sistema tarifário e a metodologia de cálculo das tarifas, definidas no Regulamento Tarifário, devem promover de forma transparente a eficiência na afectação de recursos e a equidade e justiça das tarifas, sem esquecer a necessidade de manter o equilíbrio económico e financeiro das empresas reguladas, a qualidade do fornecimento de energia eléctrica e a estabilidade da evolução tarifária [ERSE, 2011].

A remuneração das actividades reguladas através de tarifas deve ser próxima da que o mercado fixaria em ambiente concorrencial. Em concorrência perfeita, a rentabilidade de uma empresa deve teoricamente igualar o custo de oportunidade do capital investido. Num sector regulado, a tarifa fixada pelo regulador deve ter em conta, por um lado, a manutenção do equilíbrio económico-financeiro das empresas, e por outro lado, o bem-estar dos consumidores [Paiva, 2007].

As tarifas de acesso às redes, aprovadas pela ERSE e pagas por todos os consumidores de energia eléctrica, incluem as tarifas de Uso Global do Sistema, de Uso da Rede de Transporte e de Uso da Rede de Distribuição. Os clientes que escolherem o seu

comercializador no mercado livre pagam as tarifas de acesso às redes e negociam livremente os preços de fornecimento de energia e de comercialização com o seu comercializador [ERSE, 2011].

Um princípio importante é a aditividade: a tarifa aplicável ao cliente final deve ser composta por um conjunto de parcelas com origem nas várias actividades ao longo da cadeia, nomeadamente produção, transporte, gestão do sistema, distribuição e comercialização [Paiva, 2007]. Com este intuito, a ERSE definiu as seguintes tarifas a aplicar na comercialização de energia eléctrica [ERSE, 2011]:

Tarifa de Energia: são aplicadas aos fornecimentos dos comercializadores de último recurso, com o objectivo de recuperar custos com a actividade de compra e venda de energia eléctrica.

Tarifa de Uso Global do Sistema: são aplicadas pelo operador da rede de transporte ao operador da rede de distribuição, em MT e AT, para proporcionarem os proveitos da actividade de compra e venda, e da actividade de gestão global do sistema, tendo em consideração os custos associados a medidas de política energética, ambiental ou de interesse económico geral. Esta tarifa também é aplicada pelos operadores das redes de distribuição às entregas das redes de distribuição.

Tarifas de Uso da Rede de Transporte: são aplicadas pelo operador da rede de transporte ao operador da rede de distribuição em MT e AT. Esta tarifa deve proporcionar os proveitos permitidos da actividade de transporte de energia eléctrica do operador da rede de transporte em Portugal continental.

Tarifas de Uso da Rede de Distribuição: são aplicadas às entregas dos operadores das redes de distribuição, e devem proporcionar os proveitos permitidos da actividade de distribuição de energia eléctrica.

Tarifas de Comercialização: são aplicadas aos fornecimentos a clientes dos comercializadores de último recurso, e devem proporcionar os proveitos permitidos da actividade de comercialização.

Tarifas de Venda a Clientes Finais: são aplicadas aos fornecimentos dos comercializadores de último recurso, que resultam da adição das Tarifas de Energia, de Uso Global do Sistema, de Uso da Rede de Transporte, de Uso da Rede de Distribuição, e de Comercialização.

Tarifas de Acesso às Redes: são aplicadas pelos operadores das redes de distribuição às entregas da rede de distribuição, e resultam da adição das tarifas de Uso Global do Sistema, de Uso da Rede de Transporte, e de Uso das Redes de Distribuição.

A Figura 2.11 apresenta os custos e as tarifas que constituem o preço de venda da energia eléctrica adquirida por um consumidor no mercado livre.

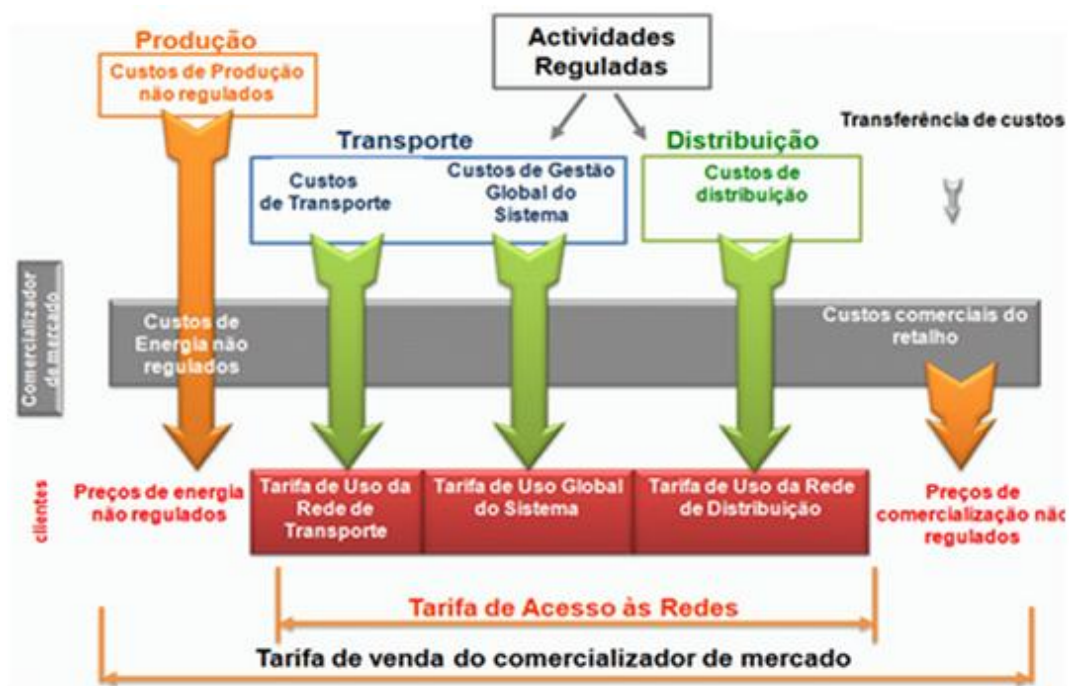


Figura 2.11 — Aditividade Tarifária: Tarifas de Acesso às redes [ERSE, 2011].

As Tarifas de Venda a Clientes Finais aplicadas pelo comercializador de último recurso aos seus clientes são calculadas a partir das tarifas por actividade incluídas no Acesso às Redes, adicionadas com as tarifas reguladas de Energia e de Comercialização. Estas tarifas reguladas são aprovadas pela ERSE [ERSE, 2011]. Na Figura 2.12 estão representados os custos e tarifas que constituem o preço de venda energia eléctrica adquirida por um consumidor a um comercializador de último recurso no mercado regulado.

A ERSE estabelece tarifas de Venda a Clientes Finais para Portugal Continental, Região Autónoma dos Açores e Região Autónoma da Madeira. As tarifas de Venda a Clientes Finais são diferenciadas por nível de tensão e tipo de fornecimento, sendo constituídas por várias opções tarifárias. Cada tarifa inclui o pagamento dos custos nas diversas actividades do sector eléctrico utilizadas pelos consumidores a quem se aplica [ERSE, 2011].

Actualmente, devido à publicação do Decreto-Lei 104/2010, de 29 de Setembro, já não é permitido aos clientes fornecidos em MAT, AT, MT e BTE a escolha de um fornecedor de energia no mercado regulado. Desde 30 de Setembro de 2010, que os consumidores destes níveis de tensão que pretendam escolher um fornecedor, têm que escolhê-lo no mercado liberalizado.

Os consumidores que estabeleceram contratos com fornecedores de electricidade antes do dia 30 de Setembro no mercado regulado, e que queiram continuar com o mesmo fornecedor, depois do dia 1 de Janeiro de 2011, terão que pagar uma tarifa de venda transitória fixada pela ERSE [EDP(b), 2011].

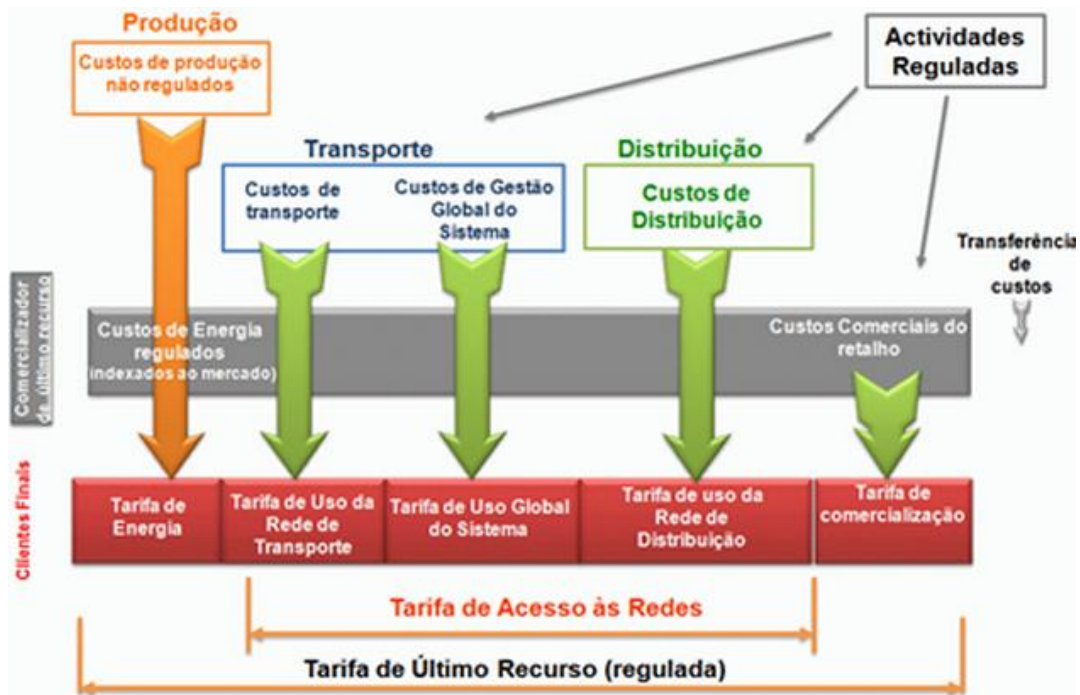


Figura 2.12 — Aditividade Tarifária: Tarifas de Venda a Clientes Finais [ERSE, 2011].

Os preços de electricidade pagos pelos consumidores têm as seguintes componentes: Energia, Redes e Custos de Interesse Económico Geral (CIEG). A componente de Energia resulta dos preços formados no mercado de electricidade. As Redes são sujeitas à regulação da ERSE e os CIEG são determinados no âmbito da legislação em vigor. O peso de cada componente nas tarifas aplicadas aos consumidores está dependente do nível de tensão do consumidor [ERSE, 2011].

2.2. Sistemas Multi-Agente

2.2.1 Introdução

Um sistema multi-agente (SMA) consiste numa rede flexível de agentes computacionais que operam em conjunto para resolver problemas cuja resolução está para além do conhecimento e das capacidades individuais de cada agente [Jennings et al., 1998]. Os agentes são normalmente autónomos e podem ser de natureza heterogénea.

Os sistemas multi-agente têm sido aplicados com sucesso num número crescente de aplicações, em diversas áreas, como a Inteligência Artificial, Engenharia de Software, Economia e outras. Estes sistemas apresentam as seguintes características [Jennings et al., 1998]:

- Não existe um controlo global do sistema;
- A informação é distribuída;
- A computação é assíncrona;
- Cada agente tem informação e controlo limitados do sistema global.

Apesar destas vantagens, o desenvolvimento de um sistema multi-agente apresenta bastantes desafios, sendo de realçar os seguintes:

1. Como formular, descrever e decompor problemas e sintetizar resultados através de um grupo de agentes inteligentes?
2. Como permitir que os agentes comuniquem e interactuam? Quais as linguagens de comunicação e protocolos que se deve usar? O que comunicar e quando?
3. Como garantir que os agentes actuem de forma coerente na tomada de decisões ou na execução de acções?
4. Como desenvolver agentes individuais capazes de representar e raciocinar sobre as acções, planos e conhecimento de outros agentes, de forma a conseguirem interagir com eles?
5. Como reconhecer e reconciliar pontos de vista díspares e intenções conflituosas entre uma colecção de agentes que tenta coordenar as suas acções?
6. Como equilibrar eficazmente a computorização e comunicação locais? Genericamente, como gerir a atribuição de recursos limitados?
7. Como evitar ou atenuar comportamentos prejudiciais do sistema, tais como o comportamento caótico ou oscilatório?
8. Como desenvolver sistemas multi-agente para aplicações reais? Como criar técnicas e plataformas para desenvolver sistemas multi-agente?

Os desafios indicados nos pontos 1 e 3 são os mais relevantes para a presente dissertação, sendo designados por “problema de projecto” e “problema de coordenação”, respectivamente. Estes dois desafios serão descritos mais pormenorizadamente na secção 3.1.

2.2.2 Agentes Autónomos

A literatura apresenta várias definições para o termo “agente”, não existindo uma versão aceite universalmente pela comunidade científica. No entanto, existe algum consenso sobre as principais características de um agente. Desde modo, apresentam-se de seguida duas definições:

“Um agente é um sistema que percepção o ambiente através de sensores e age sobre esse ambiente através de actuadores” [Russell e Norvig, 2003].

“Um Agente é um sistema computacional que está situado num ambiente e é capaz de agir de forma autónoma nesse ambiente, de modo a atingir os seus objectivos” [Wooldridge, 2009].

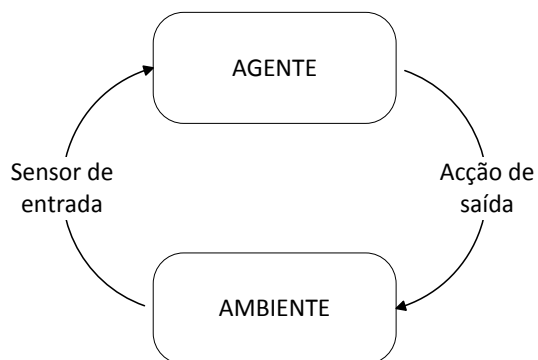


Figura 2.13 — Um agente e o seu ambiente. Adaptado de [Wooldridge, 2009].

Ou seja, de uma forma genérica, um agente é um sistema que percepção o ambiente através de sensores, interpreta a percepção, e toma decisões de forma autónoma sobre esse ambiente através de actuadores. Por exemplo, um agente pode ser um computador com câmaras (sensores) e com motores (actuadores). A Figura 2.13 apresenta um agente genérico a actuar sobre o ambiente que o rodeia.

Wooldridge e Jennings (1995) apresentam duas noções distintas para o termo “agente”, uma “fraca” e uma “forte”. A noção “fraca” diz respeito a um sistema computacional que verifica as seguintes propriedades:

- **Autonomia:** um agente opera sem intervenção directa de seres humanos e tem controlo sobre o seu estado interno e sobre as acções que executa;
- **Reactividade:** um agente tem capacidade para percepção o ambiente e responder de forma hábil às mudanças que nele ocorrem;
- **Pró-actividade:** um agente é capaz de exibir comportamento direccionado a objectivos, tomando a iniciativa;
- **Capacidade social:** um agente é capaz de interagir com outros agentes (e possivelmente com humanos) para satisfazer os seus objectivos.

A noção “forte” diz respeito a um sistema computacional que, em adição às propriedades mencionadas acima, é conceptualizado e implementado usando conceitos mentais normalmente utilizados pelos seres humanos (por exemplo, crenças, intenções, desejos, obrigações, etc).

Os agentes actuam em ambientes com diferentes características sendo de realçar as seguintes [Russel e Norvig, 2009]:

Totalmente observável x parcialmente observável (acessível x inacessível): um ambiente totalmente observável é aquele em que um agente, através dos seus sensores, consegue aceder em qualquer instante a toda a informação necessária para decidir quais as acções a executar.

Determinístico x estocástico (determinístico x não determinístico): um ambiente é determinístico quando é previsível, ou seja não há incerteza sobre o estado resultante da execução de uma acção.

Episódico x sequencial (episódico x não episódico): num ambiente episódico a experiência do agente é dividida em episódios atómicos. A escolha de uma acção depende apenas do próprio episódio. Num ambiente sequencial, a decisão actual pode afectar todas as decisões futuras.

Estático x dinâmico: considera-se um ambiente dinâmico quando este se alterar sem a intervenção directa de um agente.

Discreto x contínuo: um ambiente discreto caracteriza-se por um conjunto fixo e finito de acções, percepções e estados.

Agente individual x multi-agente: ambientes em que existe apenas um agente ou em alternativa vários agentes.

Os agentes autónomos podem classificar-se em três tipos principais, de acordo com a sua arquitectura [Wooldridge e Jennings, 1995]:

- Agentes Deliberativos;
- Agentes Reactivos;
- Agentes Híbridos.

Existe ainda outro tipo de agentes designados por Agentes BDI (“Belief-Desire-Intention”). Nos agentes BDI, o seu estado interno caracteriza-se por ter estados mentais, sendo de realçar as crenças, os desejos e as intenções.

De seguida, apresenta-se as principais características destes tipos de agentes.

2.2.2.1 Agentes Deliberativos

De uma forma geral, os agentes deliberativos têm como principal característica o facto de possuírem um modelo simbólico explícito do ambiente em que operam. A Figura 2.14 apresenta um diagrama esquemático da arquitectura de um agente deliberativo. A análise da figura permite verificar que o agente decide as acções a executar em função da percepção do ambiente e do seu estado interno. A cada percepção, o agente actualiza a informação que possui sobre o ambiente, e planeia as suas acções (para atingir os objectivos de projecto) tendo em consideração a informação actualizada.

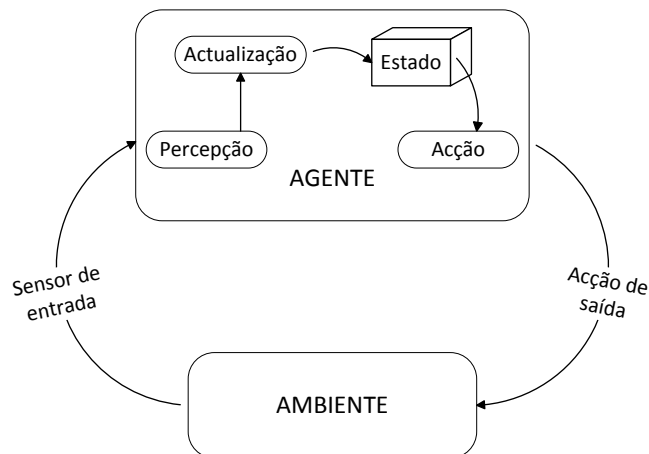


Figura 2.14 — Arquitectura de um Agente Deliberativo. Adaptado de [Wooldridge, 2009].

2.2.2.2 Agentes Reactivos

Os agentes reactivos não possuem conhecimento simbólico do ambiente nem executam qualquer tipo de raciocínio complexo. A sua principal característica consiste no facto de cada percepção originar uma reacção imediata, dependente apenas dessa percepção (ignorando qualquer estado interno, com informação sobre percepções anteriores). A reacção a uma dada percepção está pré-definida no seu programa, normalmente através de regras do tipo condição/acção. Estas regras são seleccionadas em função da situação em que o agente se encontra.

Os agentes reactivos têm a desvantagem de serem limitados na sua tomada de decisões, pois obedecem apenas a um conjunto de regras pré-definidas. A Figura 2.15 apresenta um diagrama esquemático da uma arquitectura de um agente reactivo.

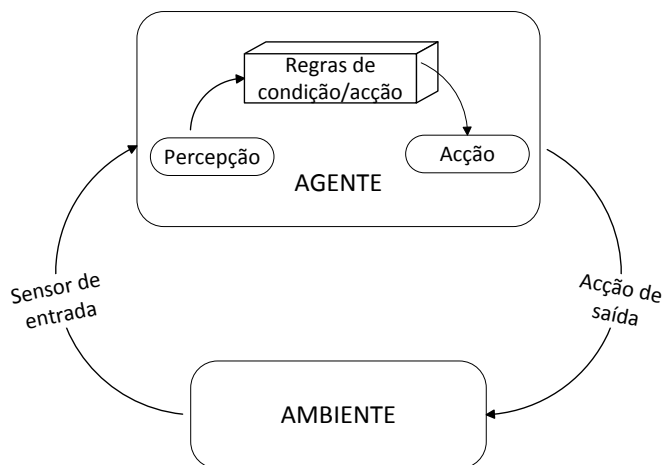


Figura 2.15 — Arquitectura de um Agente Reactivo.

2.2.2.3 Agentes Híbridos

A arquitectura dos agentes híbridos consiste numa combinação das características das arquitecturas dos agentes deliberativos e reactivos. Esta combinação permite compensar a desvantagem que os agentes deliberativos têm de, por vezes, não serem capazes de reagir de forma imediata a percepções do ambiente (compensando-se este facto com as características dos agentes reactivos). A combinação também permite compensar, com as características dos agentes deliberativos, a incapacidade dos agentes reactivos em raciocinar sobre as decisões de quais acções executar por forma obter os seus objectivos com eficiência. Os agentes híbridos caracterizam-se pela complementaridade destas duas características e a sua arquitectura é formada por camadas ou níveis. As camadas são organizadas de forma hierárquica, e normalmente as camadas do tipo reactivo têm prioridade sobre as camadas deliberativas, de modo a permitir uma reacção mais rápida a alterações detectadas no ambiente.

2.2.2.4 Agentes BDI

Os agentes BDI (“Beliefs, Desires, Intentions”) baseiam-se em três atitudes mentais distintas, nomeadamente:

- **Crenças:** as crenças de um agente descrevem a sua perspectiva sobre o estado do ambiente; representam informação sobre o agente e o ambiente que o rodeia;
- **Desejos:** os desejos representam o que o agente pretende obter (mesmo que não conheça a forma exacta como o pretende fazer); um conceito relacionado com o de desejo é o conceito de objectivo;
- **Intenções:** as intenções são um conjunto de acções ou tarefas que um agente determinou para concretizar os seus objectivos.

Um agente BDI possui normalmente uma biblioteca de planos pré-definidos, ou seja um conjunto de procedimentos simples e sequenciais que permite ao agente atingir os seus objectivos.

O funcionamento dos agentes BDI processa-se da seguinte forma: (i) o agente observa o ambiente e actualiza o conjunto de crenças, (ii) selecciona planos da biblioteca para completar os planos adoptados (os planos seleccionados constituem as opções), (iii) filtra e avalia as opções de forma a seleccionar as preferidas (as opções seleccionadas passam a ser intenções e são incluídas nos planos adoptados), e (iv) executa acções para satisfazer as intenções que compõem os planos adoptados. A Figura 2.16 apresenta a arquitectura de um agente BDI genérico [Lopes, 2004].

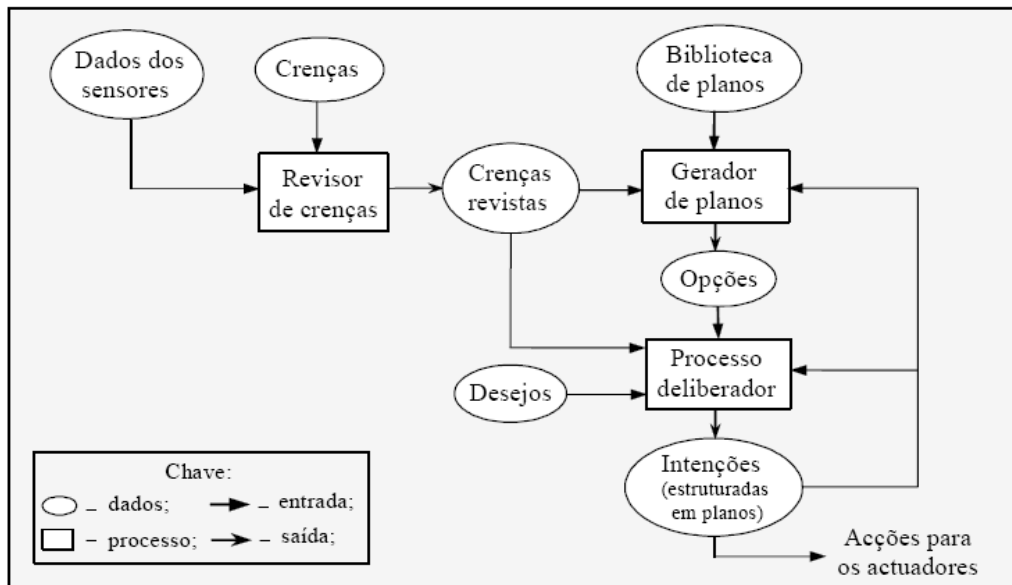


Figura 2.16 — Arquitectura de um Agente BDI.

2.2.3 Plataformas Computacionais para Sistemas Multi-Agente

As plataformas multi-agente são plataformas computacionais baseadas na tecnologia de agentes, que permitem simplificar a análise e simulação de sistemas complexos. Apresenta-se de seguida a plataforma JADE escolhida para realizar o simulador proposto, e faz-se referência a duas plataformas que têm sido utilizadas com sucesso no desenvolvimento de simuladores de mercados de energia, nomeadamente as plataformas OAA e Repast.

JADE

A plataforma JADE (*Java Agent Development Framework*) foi a plataforma escolhida para desenvolver o simulador proposto neste trabalho. Trata-se de uma plataforma de acesso livre, que facilita o desenvolvimento de agentes computacionais.

A plataforma JADE é basicamente um conjunto de programas desenvolvidos através da linguagem de programação Java, que simplificam o desenvolvimento de sistemas multi-agentes através de uma “middleware”, em conformidade com as especificações FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*). O software JADE é distribuído pela Telecom Itália, detentora dos direitos de autor [JADE, 2011].

Esta plataforma é provavelmente a mais utilizada nos dias de hoje. A interface facilita o desenvolvimento de aplicações baseadas em agentes, por meio de um conjunto de ferramentas gráficas que suportam as fases de implementação e compilação de agentes [Bellifemine et al., 2007].

O software JADE possui características relevantes para o desenvolvimento de agentes computacionais, sendo de referir a realização de arquitecturas diferentes de agente, a mobilidade dos agentes, e a reutilização de software [Bellifemine et al., 2001].

OAA

A plataforma OAA (*Open Agent Architecture*) é uma ferramenta de investigação para a construção de sistemas baseados em agentes, desenvolvida no Centro de Inteligência Artificial da SRI Internacional. A comunicação e cooperação entre os agentes são mediadas por um ou mais facilitadores, responsáveis por corresponder aos pedidos dos utilizadores e dos agentes, com descrições das capacidades de outros agentes. Deste modo, não é normalmente necessário que um solicitante (utilizador ou agente) conheça a identidade, localização ou o número de outros agentes envolvidos na satisfação de um pedido [Cheyer e Martin, 2001].

A *Interagent Communication Language* (ICL) é a linguagem de comunicação partilhada por todos os agentes, independente do computador em que são executados, ou da linguagem de programação em que são concebidos. Os agentes utilizam a ICL para realizar consultas, executar acções e trocar informações [Martin et al., 1999].

A OAA tem a vantagem de suportar agentes concebido em diferentes linguagens de programação, como por exemplo Java, C ou C++, e agentes executados em diferentes sistemas operativos. Esta plataforma foi utilizada para desenvolver o simulador de mercados de electricidade competitivos MASCEM, referido na secção 3.2.5.

Repast

A plataforma Repast (*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*) é uma ferramenta para modelação e simulação de sistemas multi-agente amplamente utilizada, de acesso livre e de código aberto, com três implementações lançadas, designadas por Repast para Java (Repast J), Repast para Microsoft.NET (Repast.Net) e Repast para Python Scripting (Repast Py) [North et al., 2007].

O Repast coloca a ênfase no comportamento social, mas não é limitado apenas aos aspectos sociais. Várias entidades têm utilizado a ferramenta Repast para desenvolver aplicações, que vão desde sistemas sociais, sistemas evolutivos, modelação de mercados, e análise industrial, entre outros [North et al., 2006]

A ferramenta Repast foi utilizada para desenvolver o simulador de mercados grossistas de electricidade AMES (apresentado na secção 3.2.4) e o simulador de mercados de electricidade EMCAS (descrito na secção 3.2.1).

2.3 Conclusão

Neste capítulo abordou-se os dois temas centrais desta dissertação, os mercados de energia eléctrica e os sistemas multi-agente. Inicialmente apresentou-se uma breve descrição sobre a reforma do sector eléctrico que permitiu a passagem de modelos em regime de monopólio a mercados de energia eléctrica liberalizados.

Indicou-se as entidades presentes nos mercados de electricidade e descreveu-se as características e funções de cada uma destas entidades. Também apresentou-se um resumo sobre a reestruturação do sector eléctrico que ocorreu a nível mundial. Indicou-se os primeiros países a iniciar a reestruturação, e descreveu-se o processo de reestruturação que ocorreu na Europa e na Península Ibérica.

Apresentou-se as características e o funcionamento do modelo de mercado em bolsa (simétrico e assimétrico), do modelo de contratos bilaterais físicos e do modelo de mercado híbrido, descrevendo-se como é realizada a comercialização de electricidade em cada um dos modelos.

Neste capítulo apresentou-se ainda o Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL), descrevendo-se o funcionamento dos operadores de mercado OMEL (pólo espanhol) e OMIP (pólo português). Indicou-se também algumas características da interligação entre as redes de transporte de Portugal e de Espanha e descreveu-se de forma sucinta o conceito de *market splitting*. Também descreveu-se as actividades essenciais do sector eléctrico português, fez-se referência à regulação económica e às tarifas aplicadas nas actividades reguladas.

Por fim apresentou-se os sistemas multi-agente. Indicou-se as principais vantagens da aplicação da tecnologia multi-agente nos mercados de energia eléctrica e os principais desafios que esta tecnologia apresenta. Indicou-se ainda os desafios mais relevantes para a realização deste trabalho (o problema do projecto e o problema da coordenação).

Apresentou-se o conceito de agente, indicando-se duas definições existentes, definiu-se a noção “fraca” e a noção “forte” de agente e apresentou-se as características dos ambientes mais relevantes onde os agentes actuam. Apresentou-se os quatro tipos principais de agentes, de acordo com a sua arquitectura (deliberativos, reactivos, híbridos e BDI). Na última secção deste capítulo descreveu-se de forma sucinta a plataforma computacional para sistemas multi-agente utilizada na realização deste trabalho (a plataforma JADE), e fez-se referência ainda a mais duas plataformas computacionais que têm sido utilizadas no desenvolvimento de mercados multi-agente de energia eléctrica, as plataformas OAA e Repast.

Capítulo 3

Mercado Multi-Agente de Energia Eléctrica

3.1 Introdução

A presente dissertação tem como objectivo modelar a contratação bilateral de electricidade num mercado de energia liberalizado, utilizando um sistema multi-agente. A concepção de um sistema multi-agente envolve vários aspectos distintos, incluindo arquitecturas, protocolos, linguagens de comunicação, e estratégias de negociação. Por exemplo, num sistema multi-agente a interacção e comunicação entre agentes necessitam de um conjunto de protocolos e linguagens de comunicação [Zhou et al., 2009].

As principais vantagens da utilização da tecnologia multi-agente em mercados de energia são as seguintes [Landaburu, 2006]:

- **Representação natural do domínio:** um sistema multi-agente constitui uma abordagem ideal para modelar mercados de energia, onde a informação e o controlo são distribuídos por natureza;
- **Robustez:** a sobreposição do conhecimento dos agentes individuais leva a que o sistema global seja mais tolerante a falhas;
- **Confiança:** a sobreposição e o cruzamento dos agentes individuais tornam o sistema mais fiável;
- **Economia:** a reutilização de “software” existente é mais barata do que o desenvolvimento de novos programas.

Como referido na secção 2.2.1, esta dissertação irá abordar os problemas de “projecto” e de “coordenação”, que para o caso específico dos mercados de energia, são formulados do seguinte modo:

1. *Problema de projecto*: como formular e descrever um mercado de energia liberalizado através de um grupo de agentes inteligentes?
2. *Problema de coordenação*: como garantir que os agentes actuam de forma coerente na execução das suas acções (por exemplo, como modelar a interacção entre retalhistas e clientes num mercado de retalho)?

Estes dois problemas irão ser descritos mais detalhadamente na secção 3.3. Antes disso, a secção 3.2 descreve e analisa os principais simuladores de mercados de energia existentes.

3.2 Simuladores de Mercados de Energia Eléctrica

A complexidade do mercado de electricidade torna necessário recorrer a abordagens avançadas de modelação, para simular o seu comportamento diário e o comportamento dos agentes que nele participam a mudanças económicas, financeiras, e a ambientes regulados. A modulação e simulação do mercado são particularmente úteis para o desenvolvimento de regras de mercado, que possibilitam o seu normal funcionamento [Conzelmann et al.].

Nesta secção, apresenta-se e compara-se alguns simuladores baseados em sistemas multi-agente, que permitem modelar e simular mercados de energia eléctrica. Os sistemas multi-agente são uma ferramenta adequada à modelização das interacções dos agentes intervenientes no mercado de energia, pois permitem simular essas interacções tendo em consideração factores sociais, económicos e ambientais.

Da pesquisa efectuada, decidiu-se apresentar e descrever os simuladores que se consideraram mais relevantes, nomeadamente:

- EMCAS (Electricity Market Complex Adaptive System);
- PowerWeb;
- SEPIA (Simulator for Electric Power Industry Agents);
- AMES (Agent-Based Modelling of Electricity Systems);
- MASCEM (Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets).

Descrevem-se de seguida as suas principais características, estrutura, vantagens, e apresentam-se algumas limitações.

3.2.1 EMCAS

O EMCAS foi desenvolvido pelo Centro de Energia, Ambiente e Sistemas de Análise Económica do *Argonne National Lab* (ANL). Sendo um dos simuladores baseados em tecnologia multi-agente mais populares para o mercado de electricidade, o EMCAS tem sido

utilizado em vários locais dos EUA com bastante sucesso. De modo geral, o EMCAS é um simulador em que os agentes possuem as capacidades de decisão descentralizada, aprendizagem, e adaptação. Cada agente contém uma ampla gama de estratégias [Zhou et al., 2009].

O EMCAS é uma ferramenta implementada através da plataforma Repast (referida na secção 2.2.3), projectada para investigar a reestruturação do mercado e compreender as implicações da concorrência sobre o preço da electricidade, e sobre a viabilidade e segurança técnica da rede eléctrica. No EMCAS, as empresas de produção são modeladas como agentes, que estão constantemente a reformular as suas estratégias de oferta, sujeitas a factores ambientais, tais como a procura prevista e as margens de reserva de capacidade, na tentativa de explorar as limitações físicas da rede e as regras de mercado.

O EMCAS possui agentes com capacidade de aprendizagem, baseada em algoritmos genéticos, que representam produtores, intermediários, consumidores e operadores de sistema. Os mecanismos de negociação incluídos vão desde contratos bilaterais até bolsas de energia, passando pelo mercado de serviços de sistema. O modelo de decisão dos agentes baseia-se na combinação de informação pública, disponibilizada a todos os participantes do mercado, e informação privada, que resulta do 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 [Pereira, 2004].

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

3.2.2 PowerWeb

O PowerWeb foi desenvolvido na Universidade de Cornell, sendo um simulador cuja utilização é feita via Internet, e permitindo deste modo que os utilizadores não tenham de estar no mesmo espaço físico. Esta ferramenta computacional tem como objectivo simular mercados de electricidade competitivos.

Neste simulador, os vendedores de energia podem licitar da única unidade de produção que podem deter, de duas formas distintas, i) explicitando o preço e quantidade dos blocos de licitação até perfazer o máximo de produção da unidade, ou ii) escolhendo uma das seis estratégias disponíveis (por exemplo licitar tudo a custo zero, licitar tudo a custo marginal, subir o preço dos blocos que foram transaccionados no dia anterior e descer o preço dos que não foram, ou licitar de forma aleatória) [Marques, 2008].

O PowerWeb apenas possibilita a simulação de alguns mercados organizados em bolsa. A utilização de agentes é limitada, sendo os agentes muito simples e apenas utilizados para

modelar diferentes ofertas de venda no mercado. Um outro aspecto, também limitativo, é o facto de não ser possível alterar a procura ao longo de toda a simulação, além do número de produtores estar limitado a apenas 3 ou 6. O ambiente gráfico é bastante interactivo, embora grande parte das características referidas não possam ser utilizadas [Pereira, 2004].

3.2.3 SEPIA

O SEPIA foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia de Honeywell (HTC 2007) e pela Universidade de Minnesota. É uma ferramenta que permite simular o mercado de electricidade, com o objectivo de compreender o comportamento dos seus participantes e as razões que originam esse comportamento. Os principais componentes físicos que podem ser simulados pelo SEPIA são: produtores, empresas de produção, produtor de último recurso, carga do consumidor, empresas consumidoras, sistema de transporte, e operador da rede de transporte [Zhou et al., 2009].

O SEPIA é um simulador que possui características bastante atraentes, nomeadamente a nível da interface gráfica (definição de cenários e análise de simulações). Por um lado, é bastante abrangente, uma vez que ao nível da rede de transporte, por exemplo, tem em conta a localização de cargas e produtores, estando também incluídas as restrições da capacidade de transporte, embora de forma simplificada. Por outro lado, é limitado no que diz respeito aos mecanismos de mercado que simula, uma vez que apenas permite a simulação de contratos bilaterais, excluindo qualquer tipo de mercado em bolsa [Pereira, 2004].

3.2.4 AMES

O AMES é um “software” de código aberto baseado em tecnologia multi-agente, desenvolvido pela *Sun and Tesfatsion*, para o estudo dos mercados grossistas de energia eléctrica. O AMES incorpora os principais elementos do projecto do mercado grossista de energia eléctrica, como recomendado pela *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC).

O AMES tem quatro componentes principais: os comercializadores grossistas, a rede de transporte, os mercados, e um operador de sistema. O AMES foi desenvolvido com recurso à linguagem de programação Java e à plataforma Repast (referida na secção 2.2.3). Os agentes comercializadores podem ser de dois tipos: compradores (entidades de procura) e vendedores (produtores). A componente de mercado tem dois sistemas possíveis, que consistem num mercado diário e num mercado em tempo real. O operador de sistema tem quatro funções: (i) avaliação da segurança do sistema, (ii) compromisso com as unidade de produção da energia negociada no dia anterior, (iii) despacho e (iv) liquidação [Zhou et al., 2009].

Neste simulador, o utilizador não tem ao seu dispor estratégias de licitação para aplicar às unidades de produção, podendo apenas escolher o algoritmo de aprendizagem que pretende utilizar. No entanto, o simulador tem em conta o congestionamento das linhas de transmissão na realização do mercado [Marques, 2008].

3.2.5 MASCEM

O MASCEM foi criado no GECAD (Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão) do Instituto Superior de Engenharia do Porto, dirigido pela Prof. Zita do Vale. O MASCEM é um simulador multi-agente para o mercado eléctrico, desenvolvido através da plataforma OAA (referido na secção 2.2.3), com base na linguagem de programação Java. O simulador modela vários tipos de mercados de energia eléctrica. Os agentes computacionais podem representar as várias entidades do mercado de energia e têm autonomia para estabelecer os seus próprios objectivos e regras de decisão. Além disso, ao longo de uma simulação, os agentes podem adaptar as suas estratégias com base no sucesso ou em fracassos anteriores. Em cada situação, os agentes adaptam dinamicamente as suas estratégias de acordo com o contexto actual e informação de contextos anteriores. [Vale et al., 2011].

Os principais tipos de agentes existentes no MASCEM incluem um facilitador de mercado, produtores, consumidores, um operador de mercado, retalhistas, e um operador de sistema. Os mercados considerados no MASCEM são um mercado em bolsa e um mercado de contratos bilaterais. Os consumidores no MASCEM não são necessariamente atribuídos a um comercializador. Em vez disso, os consumidores individuais podem apresentar directamente as suas propostas de compra ao operador de mercado na bolsa. O facilitador do mercado, principalmente actuando como um agente regulador, é utilizado para coordenar e monitorizar as simulações do mercado de energia. O operador de mercado assume a função de pedir as licitações do mercado, recebendo as ofertas de venda e compra, determinando os preços de mercado e finalmente, tomando a decisão de aceitar ou rejeitar as propostas recebidas. No mercado de contratos bilaterais, os produtores e os retalhistas negociam directamente uns com os outros os termos dos contratos. No entanto, as propostas aceites no mercado em bolsa e nos contratos bilaterais têm de ser enviados para o operador de sistema, para verificação da capacidade da rede de transporte [Zhou et al., 2009].

Com base nos resultados obtidos numa ronda negocial, os agentes actualizam as suas estratégias para a próxima ronda. Os agentes (compradores e vendedores) têm um comportamento estratégico para definir o preço que pretendem. Estes agentes podem utilizar estratégias dependentes do tempo, que permitem alterar os valores dos preços de acordo com o tempo restante até ao final da negociação, e estratégias dependentes do comportamento, que possibilitam definir os preços da ronda seguinte, de acordo com os resultados obtidos na anterior [Praça et al., 2007]

3.2.6 Comparação entre os Simuladores

A Tabela 3.1 resume as principais características de cada simulador e efectua uma análise comparativa dos vários simuladores.

Em termos gerais, é importante realçar que os simuladores analisados são complexos, permitindo efectuar a simulação de diferentes tipos de contratação de energia eléctrica, como os modelos em bolsa (simétrica e assimétrica) e os contratos bilaterais, tendo em consideração a análise e gestão da rede eléctrica em causa (por exemplo, verificação da existência de situações de congestionamento). Existem ainda outros simuladores mais simples que permitem apenas uma análise de mercados de energia sem ter em consideração as condições técnicas da rede.

Alguns simuladores possibilitam desenvolver agentes computacionais com capacidade de aprendizagem, o que permite a adaptação das suas estratégias ao problema em questão, por forma a maximizarem os seus objectivos. Entre os simuladores analisados, apenas o PowerWeb não tem algoritmos de aprendizagem implementados. Os restantes têm algoritmos de aprendizagem baseados em *Q-learning*, *Variant Roth-Erev* ou algoritmos genéticos.

O PowerWeb tem a particularidade de permitir que diferentes utilizadores realizem, através da Internet, uma simulação. Nenhum dos outros simuladores analisados possui esta característica. Verificou-se também que os principais tipos de agentes modelados nos simuladores incluem produtores, retalhistas, consumidores (empresas ou particulares), redes de transporte e operadores de sistema.

Da comparação feita, conclui-se que as funções e a configuração do EMCAS e do MASCEM são similares. No entanto, uma diferença importante consiste na análise de cenários do sistema MASCEM, com apoio de informação histórica (cenários anteriores), o que possibilita aos agentes adaptarem as suas estratégias de acordo com as características do caso em estudo.

Como conclusão, salienta-se que os simuladores multi-agente desempenham um papel importante na área dos mercados de electricidade, constituindo uma ferramenta de apoio na tomada de decisões técnicas e económicas. O seu desenvolvimento e uso tem aumento nos últimos anos. No entanto, devido à complexidade dos mercados de energia eléctrica, os simuladores existentes apresentam limitações ao nível dos agentes intervenientes, das opções de mercado, e da análise técnica das redes.

	EMCAS	PowerWeb	SEPIA	AMES	MASCHEM
Modelo de Mercado	Contratos Bilaterais, Bolsa (Simétrica), Mercado de Serviços de Sistema	Bolsa (Assimétrica)	Contratos Bilaterais	Bolsa (Simétrica)	Contratos Bilaterais, Bolsa (Assimétrica e Simétrica), Mercado Híbrido
Tipos de Agentes	Produtores; Consumidores; Distribuidores; Oper. de Sistema; Reguladores	Vendedores; Oper. de Sistema	Produtores; Consumidores; Oper. Rede de Transp.; Gerador último recurso	Vendedores; Compradores; Oper. de Sistema	Comercializadores; Compradores; Oper. de Mercado; Oper. de Sistema
Rede de Transporte	Incluída mas simplificada em algumas zonas	Incluída	Incluída mas simplificada em zonas	Incluída	Localizações incluídas e análise da rede
Comportamento dos agentes	Aprendizagem através de Algoritmos Genéticos	Comportamento simples para definir ofertas de venda	Aprendizagem (Q-learning) dos Agentes Produtores	Aprendizagem Variant Roth-Erev (VRE)	Estratégias dependentes do tempo e do comportamento
Sistema Multi-Agente	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Licença	Comercial	Livre	Comercial	Código aberto	Projecto de Investigação

Tabela 3.1 — Características dos simuladores de mercados de energia eléctrica analisados.

3.3 Mercado Multi-Agente de Energia Eléctrica

3.3.1 Agentes Computacionais Autónomos

O problema de projecto diz respeito ao domínio que um sistema pretende resolver de forma distribuída, nomeadamente um mercado de energia liberalizado, envolvendo um mercado grossista e um mercado retalhista. Em termos práticos, o mercado grossista permite o comércio entre produtores e retalhistas de energia. Por sua vez, o mercado de retalho permite o comércio entre consumidores finais (industriais ou domésticos) e retalhistas. Deste modo, consideram-se três tipos de agentes nesta dissertação (ver Figura 3.1):

1. *Agentes produtores ou geradores*: representam empresas produtoras de energia a operar no mercado grossista.
2. *Agentes de retalho ou fornecedores*: representam retalhistas de energia que operam em ambos os mercados, ou seja, compram energia no mercado grossista e vendem no mercado de retalho.
3. *Agentes consumidores ou clientes*: representam consumidores finais e operam no mercado de retalho.

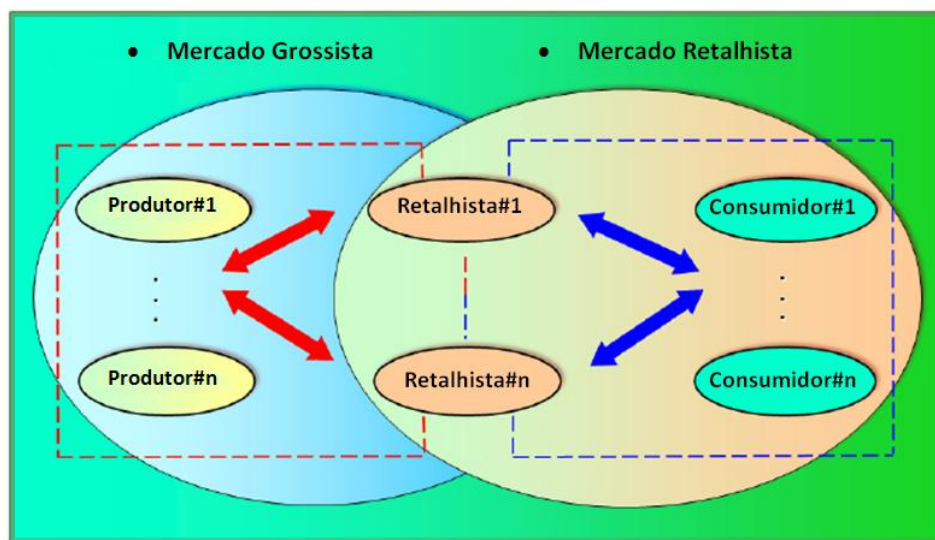


Figura 3.1 — Mercado de energia multi-agente. Adaptado de [Lopes et al., 2010].

Nos contratos bilaterais de energia eléctrica, a compra e venda de energia é feita de forma livre. As únicas regras existentes para a negociação e para a contratação de energia eléctrica entre um agente comprador e um agente vendedor são a obrigatoriedade de informar o operador de sistema sobre o volume de energia contratada, os barramentos de injeção e absorção, e a data e horário que pretendem transportar a energia na rede eléctrica. Outras informações tais como o processo de negociação entre os dois agentes (vendedor e

comprador) até chegarem a um acordo não precisam de ser reveladas e geralmente mantêm-se em privado. Neste tipo de contratação, os participantes negociam para atingirem os seus objectivos pessoais. Normalmente, o objectivo do agente vendedor é a maximização do lucro e o do agente comprador a minimização do custo. Apresenta-se de seguida uma descrição sucinta dos principais tipos de agentes referidos acima.

Agente Produtor

O agente produtor desempenha o papel de vendedor no mercado grossista, sendo o responsável pela produção da energia contratada através dos contratos bilaterais e dos mercados organizados. Sendo este agente um vendedor, inicia a negociação oferecendo preços elevados, que vão decrescendo gradualmente ao longo do processo negocial.

Para um produtor de energia, o custo marginal de produção e a previsão do consumo de electricidade são os principais factores a ter em conta na decisão da capacidade de produção destinada aos contratos bilaterais e aos mercados em bolsa. Quanto maior for a previsão do consumo, maior será a percentagem da capacidade de produção aplicada nos mercados em bolsa. Por outro lado, o benefício marginal do consumo e o preço de equilíbrio que o mercado de energia previu, são os principais factores para o consumidor poder decidir sobre a compra da sua energia a partir dos contratos bilaterais ou através de mercados em bolsa [Rahimi-Kian et al., 2006].

Agente Retalhista

O Agente retalhista está presente no mercado grossista, representando um comprador que compra electricidade a um produtor, e no mercado de retalho, como um vendedor que vende energia a um consumidor (industrial, comercial ou doméstico) através da contratação bilateral.

O principal objectivo do agente retalhista é maximizar o lucro nas suas operações de venda, tendo em conta as garantias de fiabilidade e qualidade que apresenta aos clientes, por forma a que estes fiquem o mais satisfeitos possível (para que não mudem de retalhista). O retalhista também tem como objectivo conseguir captar o maior número possível de novos clientes.

No entanto, para que um retalhista consiga maximizar o lucro, este tem que efectuar uma gestão eficiente das compras e vendas de energia. O retalhista compra energia no mercado grossista a um preço variável e vende essa energia, no mercado retalhista, a um preço fixo. O retalhista normalmente perde dinheiro, durante períodos de preços elevados no mercado grossista, porque o preço a que compra a energia é superior ao preço a que revende essa energia no mercado retalhista. Por outro lado, durante períodos em que os preços do mercado grossista são baixos, o retalhista obtém lucro, porque os seus preços de venda a retalho são superiores aos preços de compra. Para conseguir permanecer no negócio, o preço médio ponderado a que um retalhista compra energia eléctrica deve ser inferior aos preços que cobra

aos seus clientes. Isto nem sempre é fácil de conseguir, porque o retalhista não tem controlo directo sobre a quantidade de energia que os clientes consomem [Kirschen e Strbac, 2004].

Agente Consumidor

O agente consumidor assume o papel de comprador no mercado retalhista, podendo representar uma entidade individual, como por exemplo um consumidor doméstico, ou um grupo, como por exemplo um consumidor comercial, de serviços ou industrial. Quando este agente tem a opção de escolher um vendedor, de entre um grupo de potenciais vendedores, ele tenderá a escolher aquele que lhe oferecer os preços de energia mais baixos. Existem, no entanto, outros factores que influenciam a decisão, tais como a qualidade da energia, a segurança, e o atendimento ao cliente. Em geral a decisão de compra de energia deste agente depende da ponderação de vários factores, como o preço, a necessidade de consumo, a elasticidade da procura, o ajuste à mudança de preço e a eficiência energética.

Em situações em que existe preços de energia eléctrica mais elevados, os consumidores em geral em vez de simplesmente reduzir o consumo como resposta aos preços mais elevados, podem decidir retardar este consumo até um período em que os preços sejam mais baixos. Por exemplo, um fabricante pode decidir atrasar uma etapa de um processo de fabricação que envolve um consumo de energia intenso até ao turno da noite, se o preço da energia eléctrica for mais barato nesse período [Kirschen e Strbac, 2004].

3.3.2 Negociação entre Agentes Computacionais

O problema de coordenação consiste essencialmente em garantir que os agentes actuam de forma coerente, por forma a atingirem os seus objectivos com sucesso. Este problema irá ser resolvido, pelo menos em parte, através do desenvolvimento de agentes capazes de coordenarem as suas actividades por meio da negociação.

Para o caso concreto dos mercados de energia, pretende-se desenvolver agentes que operem num mercado retalhista e sejam capazes de negociarem diferentes contratos bilaterais.

A negociação computacional é um processo que permite aos agentes resolverem conflitos e atingirem os seus objectivos com sucesso. Existem dois tipos de negociação: cooperativa e competitiva. Numa negociação competitiva, os agentes negociam para optimizarem os seus objectivos, enquanto que numa negociação cooperativa, os agentes negociam para maximizarem os objectivos conjuntos (de ambos os agentes) [Zhou et al., 2009].

A negociação, tal como outras formas de interacção social, envolve frequentemente várias fases distintas. Uma fase é um período coerente de interacção caracterizado por um grupo dominante de acções comunicativas. Os modelos baseados em fases fornecem uma explicação narrativa do processo negocial, ou seja, identificam sequências de eventos que constituem a história da negociação. A maioria dos modelos baseia-se em três fases: fase

inicial, de resolução de problemas, e fase final. Estas fases motivaram a definição de um esquema genérico do processo negocial [Lopes et al., 2009]. Os seus principais processos são os seguintes:

1. Um processo de pré-negociação;
2. Um processo de negociação;
3. Um processo de resolução de impasses;
4. Um processo de renegociação.

Os processos de pré-negociação e de negociação são os mais importantes para a presente dissertação, de seguida descreve-se de forma sucinta o processo da pré-negociação.

Pré-negociação

O processo de pré-negociação tem em conta as tarefas operacionais e estratégicas de preparação e planeamento da negociação. Uma preparação efectiva envolve principalmente a criação de um plano bem definido. Os negociadores que se preparam cuidadosamente efectuam várias actividades, incluindo [Lopes et al., 2008]:

1. Definir os itens de negociação;
2. Estabelecer prioridades para os itens;
3. Definir o protocolo e seleccionar uma estratégia de negociação.

Em primeiro lugar, cada negociador deve definir os itens a serem discutidos. Em qualquer negociação, uma lista detalhada de itens pode ser obtida de várias fontes (por exemplo, uma análise do conflito, ou experiências passadas em situações similares). Em seguida, cada negociador deve reunir todos os itens que foram definidos numa lista global. A junção das listas de todos os negociadores determina a agenda negocial.

O próximo passo consiste em definir dois pontos para cada item em jogo:

1. Limite — ponto onde cada negociador decide que deve interromper a negociação em vez de continuar, porque qualquer acordo para além deste ponto não é minimamente aceitável;
2. Nível de Aspiração — ponto onde cada negociador espera realisticamente atingir uma solução.

Após definirem estes dois pontos, os negociadores normalmente definem um terceiro ponto, o ponto optimístico, que representa o melhor acordo que o negociador acredita que possa conseguir.

Para que a importância de cada item de negociação seja clara, podem-se definir mais dois parâmetros:

- Prioridade — número inteiro que representa a ordem de importância de um item;
- Peso — número real, normalizado, que representa a importância relativa de cada item (por exemplo, um item com um peso igual a 0,5 é cinco vezes mais importante do que um item com um peso igual a 0,1).

Os pesos complementam as prioridades dos itens, e a soma dos pesos de cada item a negociar é igual normalmente à unidade. [Lopes, 2004].

Posteriormente os negociadores devem escolher o protocolo, que define as regras de interacção, e as estratégias que pretendem utilizar na negociação.

3.4 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se o Mercado Multi-Agente de Energia Eléctrica. Iniciou-se o capítulo com uma análise aos simuladores de mercados de electricidade mais relevantes, apresentou-se uma descrição das suas características mais importantes e por fim realizou-se uma discussão e comparação dos simuladores.

Actualmente, existem vários simuladores desenvolvidos através da tecnologia multi-agente (e não só), que permitem modelar e simular os mercados de energia eléctrica. Nesta dissertação destacam-se o simulador EMCAS e o simulador SEPIA, que têm sido utilizados em concessionárias das redes de distribuição e das redes de transporte. Destaca-se ainda o simulador PowerWeb, que permite que se faça a simulação através da Internet e o simulador MASCEM que assume um papel importante de investigação na área de mercados de electricidade liberalizados, permitindo a simulação de comercialização de electricidade através de mercados em bolsa e de contratos bilaterais. Os participantes do MASCEM possuem estratégias de negociação e algoritmos de aprendizagem para apoiar a tomada de decisões dos participantes de forma a maximizar a concretização dos seus objectivos.

Após a apresentação dos simuladores fez-se uma descrição sucinta das principais características dos agentes: produtores, retalhistas e consumidores. Descreveu-se também os principais aspectos que envolvem uma negociação entre agentes computacionais, tais como as fases de uma negociação, e descreveu-se ainda de forma sucinta, os passos dados na realização de uma pré-negociação.

Nos mercados de energia, os agentes que negociam preços de electricidade através de contratos bilaterais são os produtores (que assumem um papel de vendedores), os retalhistas, que no mercado grossista actuam como compradores e no mercado retalhista como vendedores, e os consumidores finais, que actuam como compradores. Os vendedores geralmente iniciam a negociação oferecendo preços baixos que aumentam progressivamente.

Os compradores comportam-se de forma contrária, no início da negociação fazem propostas de preços elevados que diminuem durante o decorrer da negociação.

O desenvolvimento de sistemas multi-agente tem permitido modelar as interações, cada vez mais complexas e dinâmicas entre os agentes participantes nos mercados de energia eléctrica. A capacidade desses sistemas para modelar estas interações considerando os factores sociais, ambientais e económicos, torna-os numa ferramenta útil e de grande potencial nesta área.

Capítulo 4

SCBE – Simulador de Contratos Bilaterais de Electricidade

4.1 Introdução

A ferramenta computacional SCBE consiste essencialmente num simulador baseado em tecnologia multi-agente, aplicado aos contractos bilaterais físicos em mercados de energia eléctrica. O SCBE foi desenvolvido através da linguagem de programação Java e utilizando a ferramenta de desenvolvimento de sistemas multi-agente JADE, descrito na secção 2.2.3. O SCBE permite simular a negociação entre um vendedor e um comprador de electricidade sobre diferentes preços de tarifas do tipo DSM (Gestão da Procura de Energia), tanto no mercado grossista, como no mercado retalhista. Esta ferramenta foi desenvolvida para auxiliar os agentes intervenientes nos mercados de electricidade na análise e experimentação de várias técnicas de negociação, por forma a verificar quais as que se adequam melhor aos objectivos que pretendem atingir.

Antes de o utilizador iniciar uma simulação, necessita de inserir no SCBE, informações sobre o agente comprador e o agente vendedor. Deste modo, para facilitar a utilização do SCBE, criou-se uma interface simples, onde é possível a inserção de dados, iniciar a negociação, e observar os resultados obtidos. Os agentes negociam através de um protocolo simples de ofertas alternadas. Em termos sucintos este protocolo permite a troca iterativa de propostas e contrapropostas (cada proposta e contraposta é constituída por quatro itens de negociação que correspondem a tarifas de horas de ponta, cheia, vazio e super vazio). Os agentes apresentam alternadamente as suas propostas em instantes temporais $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$, $n \in \mathbb{N}$.

4.2 Interface

Para facilitar a utilização do SCBE desenvolveu-se uma interface gráfica recorrendo à linguagem de programação Java. A interface é simples e contém apenas os campos relativos aos dados estritamente essenciais para realizar a simulação. Para que o programa seja acessível a qualquer pessoa que o pretenda utilizar, decidiu-se desenvolver a interface em inglês, permitindo desta forma a sua utilização por um grupo mais abrangente de pessoas.

Actualmente, a interface permite que o utilizador insira os dados do agente vendedor e do agente comprador, observar o decorrer da negociação, e visualizar os resultados finais. Para exemplificar a utilização da interface, utilizou-se os dados do caso de estudo que irá ser descrito no Capítulo 5.

Quando o programa é iniciado, e antes de começar a simulação da negociação, é necessário criar o agente comprador e o agente vendedor. Para isso, o utilizador tem que inserir dados num grupo de quatro janelas, para cada um dos agentes, onde indica informações pessoais de cada agente, os valores dos itens a negociar, e alguns parâmetros necessários para o programa realizar a simulação da negociação.

As duas janelas iniciais, denominadas de *Agent Identification – Part 1 of 4* são apresentadas na Figura 4.1. Sendo uma janela para o agente comprador e outra janela para o agente vendedor. Nestas janelas o único campo de preenchimento obrigatório é o campo referente ao nome.

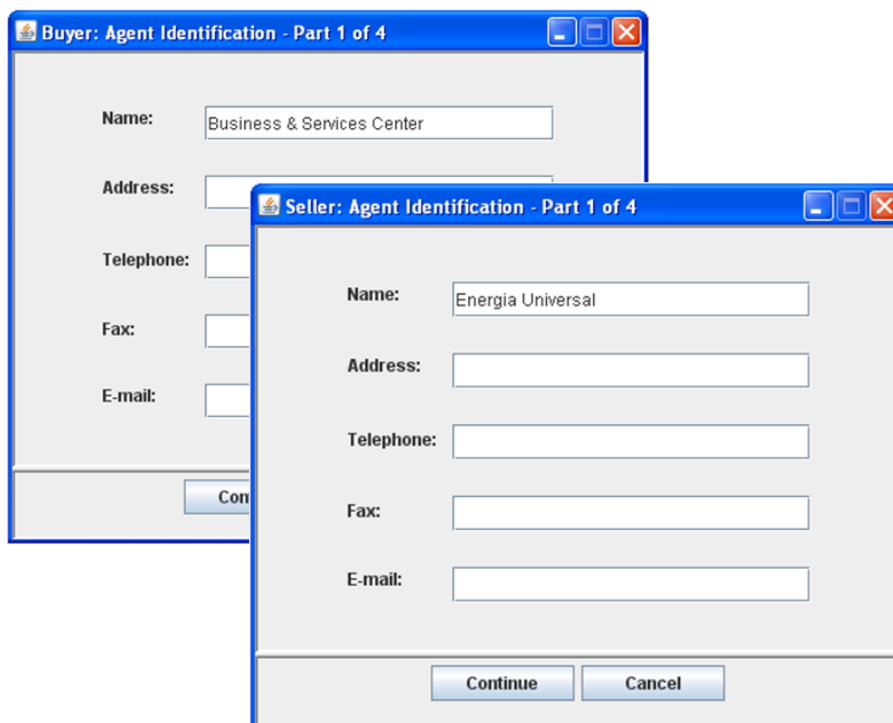


Figura 4.1 — Janelas iniciais do simulador.

Como as primeiras quatro janelas do agente comprador e do vendedor são idênticas, irá descrever-se apenas a criação do agente comprador, (para fazer a criação do agente vendedor procede-se da mesma forma, preenchendo os campos com os respectivos dados). Depois de inserida a informação pessoal do agente, clica-se no botão *Continue*, e automaticamente aparecerá a janela denominada de *Prices, Energies and Weights - Part 2 of 4* correspondente aos dados dos preços, volumes de energia, e pesos de cada período (ver Figura 4.2).

Nesta janela o utilizador necessita de preencher todos os campos indicados, inserindo os valores dos preços, dos volumes de energia e dos pesos para os períodos 1, 2, 3 e 4. Os pesos representam a importância relativa de cada item (referidos na secção 3.3.2) e determinam-se através da divisão do volume de energia do período correspondente pelo volume total da soma dos quatro períodos:

$$W_k = \frac{V_k}{\sum_{i=1}^4 V_k} \quad (1)$$

Os períodos correspondem a tarifas de ponta, cheia, vazio normal e super vazio. O utilizador escolhe qual o período que corresponde a cada tarifa. Depois de preencher todos os campos, o utilizador clica no botão *Continue* e o programa apresentará a terceira janela, denominada de *Limits, Target Points and Optimistic Points – Part 3 of 4* (ver na Figura 4.3).

Na terceira janela, inicia-se a inserção dos dados sobre os parâmetros que correspondem à pré-negociação (lembrar a secção 3.3.2.).

Period load	Price (€/MWh)	Energy (MWh)	Weight
Period 1:	49.81	1130	0.27
Period 2:	45.23	2030	0.49
Period 3:	41.51	429	0.10
Period 4:	34.84	567	0.14

Figura 4.2 — Janela do agente comprador com os preços e volumes de energia.

Period load	Limit	Target Point	Optimistic Point
Period 1:	57.98	53.96	46.82
Period 2:	53.39	49.31	42.27
Period 3:	49.67	45.65	38.55
Period 4:	42.98	38.97	31.81

Buttons: Continue, Cancel

Figura 4.3 — Janela do agente comprador com os parâmetros da pré-negociação.

Depois de o utilizador concluir o preenchimento dos campos da terceira janela, deve clicar no botão *Continue* e o programa apresentará a última janela de inserção de dados, denominada de *Preferences and Strategies* (ver Figura 4.4), onde se escolhe o modelo que estabelece as preferências do utilizador, através do campo *Preferences*. Actualmente, este campo tem apenas uma opção disponível: *Additive Function*. Esta opção diz respeito ao modelo aditivo baseado na função utilidade, referida na secção 4.3.3.

Além disso, a janela permite seleccionar a estratégia de negociação. O utilizador escolhe uma opção do campo *Strategies*, que indica a estratégia que será adoptada pelo agente. A interface apresenta ao utilizador uma opção para escolha da estratégia a utilizar, caso por exemplo: *Concession Strategy*. Depois de inseridos os dados indicados anteriormente, e depois de clicar no botão *Save*, o agente é criado e aparece a janela referente ao processo da negociação e ao resultado final da simulação (ver Figura 4.5).

Preferences: Additive Function

Strategies: Concession Strategy

Buttons: Save, Cancel

Figura 4.4 — Janela do agente comprador com as preferências e as estratégias.

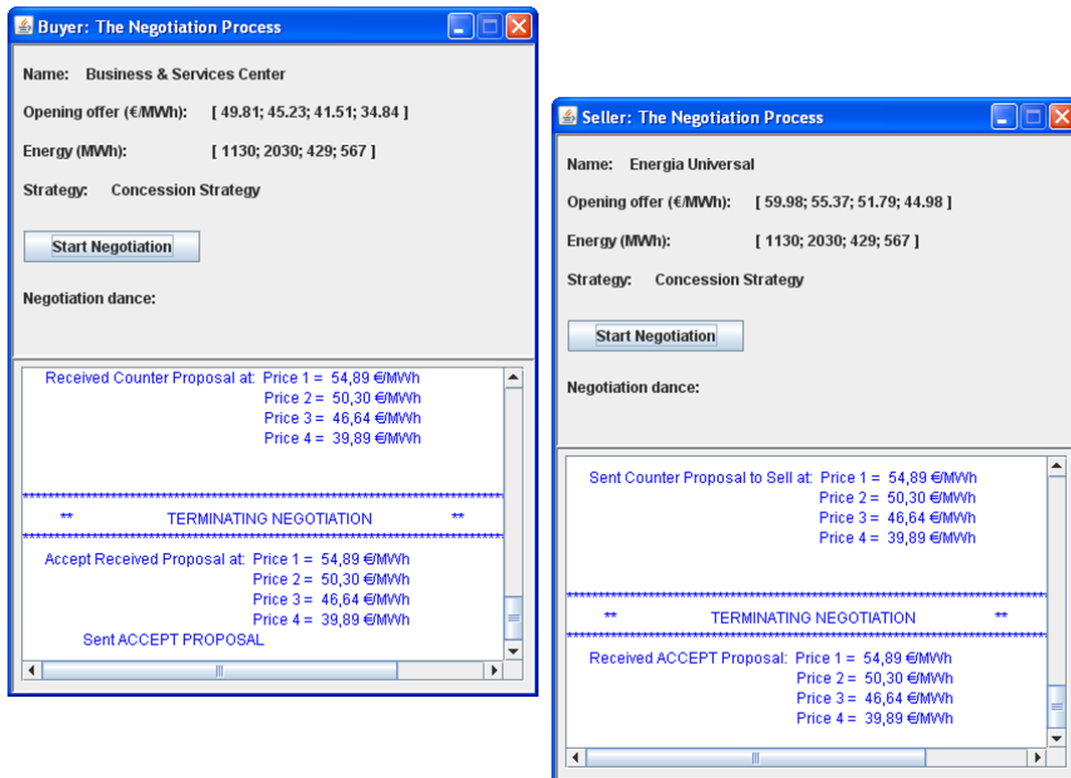


Figura 4.5 — Janelas finais do agente comprador e vendedor.

Na Figura 4.5 estão indicadas as janelas que o programa apresenta quando os agentes são criados. Nestas janelas é possível observar os nomes dos agentes, as propostas iniciais, os volumes de energia associados e a estratégia que o agente irá utilizar. Para iniciar a simulação da negociação, o utilizador deve clicar no botão *Start Negotiation*, da janela do agente comprador. Ao clicar neste botão, o agente envia um pedido de proposta ao agente vendedor. Posteriormente, o utilizador deve clicar no botão *Start Negotiation* da janela do agente vendedor, para que este inicie a interacção com o agente comprador. Nesse momento, inicia-se o processo que é apresentado na parte inferior das janelas, onde fica registado o histórico das propostas enviadas e recebidas por cada um dos agentes, e o resultado final.

Para que a simulação da negociação seja possível, o utilizador tem que inserir correctamente todos os dados. Na janela *Agent identification – Part 1 of 4*, o utilizador apenas é obrigado a inserir dados no nome do agente. Caso não insira um nome, por exemplo no agente comprador, o programa apresenta uma janela de aviso com a seguinte informação, “Specify a name to the Buyer Agent.”. Nas janelas *Prices, Energies and Weights - Part 2 of 4* e *Limits, Target Points and Optimistic Points – Part 3 of 4*, todos os campos têm que ser preenchidos com números reais e positivos, caso os campos não sejam todos preenchidos o simulador apresenta a informação “Please fill out all the fields.” caso o utilizador não preencha os campos com números reais positivos o programa apresenta o aviso “Please enter only positive numbers”. A Figura 4.6 apresenta as janelas que informam o utilizador sobre os avisos indicados anteriormente.

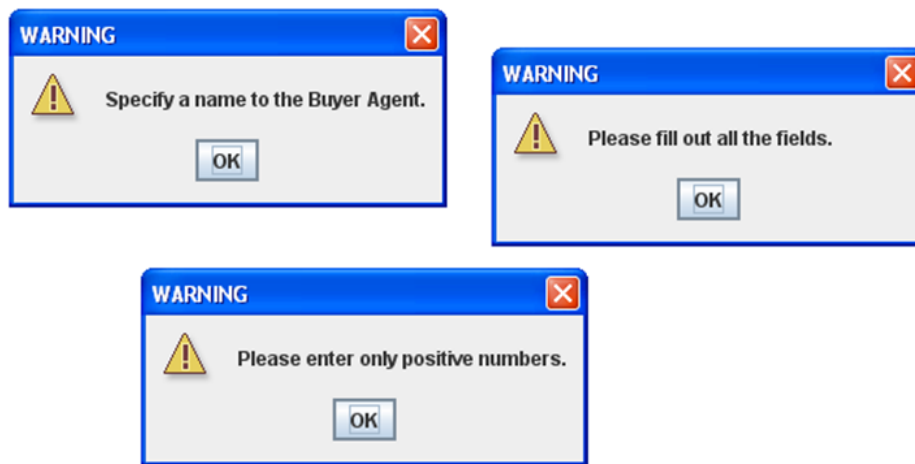


Figura 4.6 — Janelas de aviso ao utilizador.

4.3 Protocolo de ofertas alternadas

Um protocolo de negociação define as regras de interação entre duas ou mais partes negociais. Existem diferentes tipos de protocolos, que dependem do tipo e da quantidade de informação utilizada pelos negociadores. Um protocolo pode ser simples, complexo, ou sofisticado (muito complexo). Um protocolo simples permite que os agentes troquem apenas propostas ou contrapropostas, o protocolo complexo permite que os agentes forneçam comentários às propostas que recebem, e por fim um protocolo sofisticado permite que os agentes forneçam argumentos para sustentar a sua posição negocial. Para o simulador SCBE escolheu-se um protocolo simples de ofertas alternadas.

No protocolo implementado, um agente comprador ag_c inicia o processo negocial enviando um pedido de proposta $pedprop$ para um agente vendedor ag_v . O agente ag_v recebe o pedido e envia a sua proposta inicial $prop_{t_1}$ (constituída por quatro preços). Considera-se um conjunto $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$, $n \in \mathbb{N}$, de períodos temporais. Os agentes trocam alternadamente propostas, com um agente a submeter propostas nos períodos ímpares $\{t_1, t_3, t_5, \dots\}$ e o outro agente nos períodos pares $\{t_2, t_4, t_6, \dots\}$.

4.3.1 Representação por Diagrama de Estados

O protocolo de ofertas alternadas envolve seis estados negociais. Esses estados são os seguintes:

- *Estado 0* ou *Início*: representa o estado em que o agente ag_c envia um pedido de proposta $pedprop$ ao agente ag_v ;
- *Estado 1* ou *Proposta Inicial*: representa o estado em que o agente ag_v recebe o pedido de proposta inicial $prop_{t_1}$ do agente ag_c .

- *Estado 2* ou *Proposta*: representa o estado em que o agente ag_c recebe uma proposta $prop_{tn}$;
- *Estado 3* ou *Contraproposta*: representa o estado em que o agente ag_v recebe uma contraproposta $prop_{tn+1}$;
- *Estado 4* ou *Acordo*: o protocolo transita para o estado quatro quando os dois agentes alcançam um acordo sobre os itens de negociação;
- *Estado 5* ou *Fim*: neste estado o protocolo termina.

A Figura 4.7 apresenta o diagrama de estados do protocolo de ofertas alternadas. As ovals representam os estados possíveis do protocolo, as setas representam a transição entre os estados, o parâmetro $pedprop$ representa a mensagem de pedido de proposta, o parâmetro $prop_{t1}$ representa a mensagem com a proposta inicial do agente ag_v , o parâmetro $prop$ representa uma mensagem de uma proposta genérica, o parâmetros $aceita$ representa uma mensagem de aceitação de uma proposta e o parâmetro $termina$ representa uma mensagem de fim do programa.

O protocolo inicia-se no estado inicial ou “Estado 0”, que apenas permite que o agente ag_c envie um pedido de proposta $pedprop$ ao agente ag_v . Quando o agente ag_v recebe o pedido

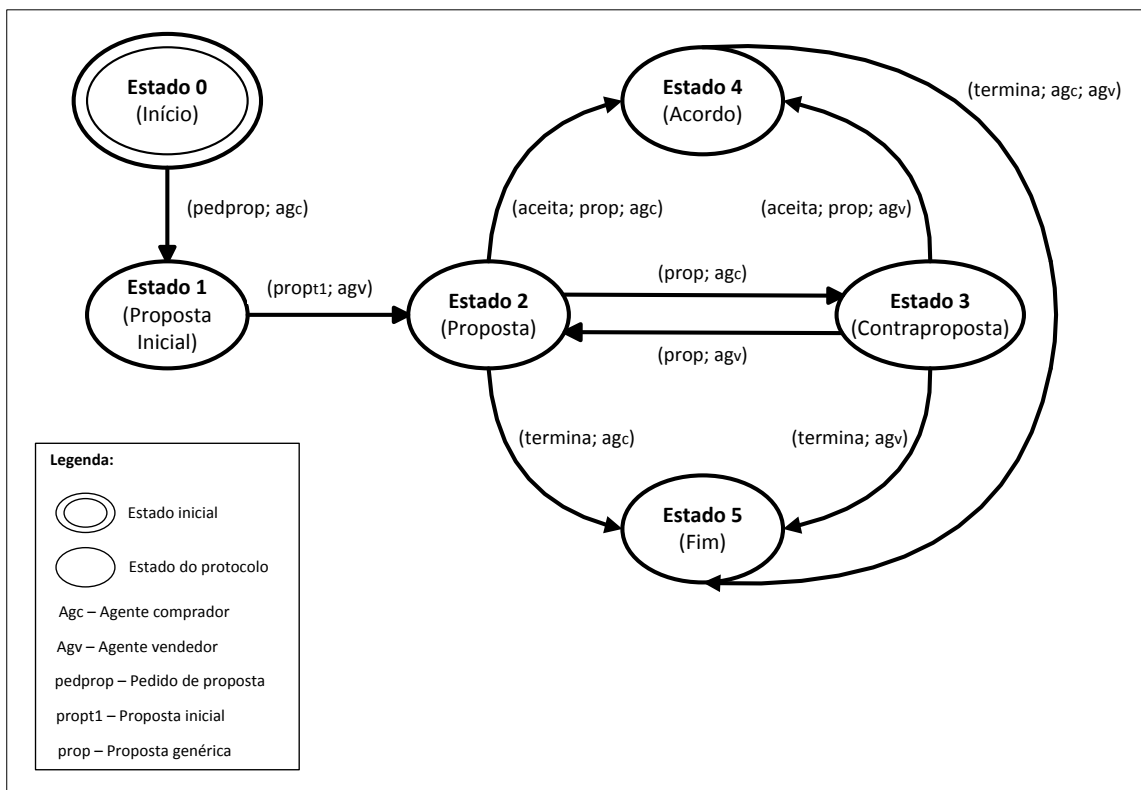


Figura 4.7 — Diagrama de estados do protocolo de ofertas alternadas.

de proposta $pedprop$ o protocolo transita para o “Estado 1”. A transição para o “Estado 2” acontece quando o agente ag_v envia a sua proposta inicial $prop_{t1}$ ao agente ag_c .

No “Estado 2” o agente ag_c recebe uma proposta $prop_{tn}$ tendo que decidir entre três opções possíveis. Na primeira opção, o agente pode não concordar com a proposta $prop_{tn}$, porque os valores oferecidos ultrapassam os limites que o agente está disposto a aceitar e por esta razão desiste da negociação, neste caso os dois agentes não obtêm um acordo e o protocolo transita para o “Estado 5”. Na segunda opção, o agente pode ficar satisfeito com a proposta $prop_{tn}$, decide aceitar esta proposta, e não envia uma contraproposta $prop_{tn+1}$. Nesta opção, os dois agentes chegam a um acordo e o protocolo transita para o “Estado 4”. Na terceira e última opção o agente não concorda com a proposta $prop_{tn}$, mas decide negociá-la apresentando uma contraproposta $prop_{tn+1}$ ao outro agente. Nesta opção, o protocolo transita para o “Estado 3”.

No “Estado 3” o agente ag_v recebe uma proposta $prop_{tn}$ e tem que optar pelas três opções referidas para o “Estado 2”. O agente ag_c pode desistir da negociação e terminá-la, transitando para o “Estado 5”, ou pode aceitar a proposta $prop_{tn}$ e terminar o processo de negociação com um acordo, transitando para o “Estado 4”, ou então pode decidir que ainda não está satisfeito com a proposta $prop_{tn}$ recebida, e continuar a negociação, apresentando uma contraproposta $prop_{tn+1}$, e transitando para o “Estado 2”.

A negociação transita para o “Estado 4” quando um dos agentes concordar com os valores dos itens de negociação de uma proposta $prop_{tn}$ apresentada pelo outro agente. Nesta situação, os dois agentes comprometem-se com a proposta aceite por ambos e transitam para o “Estado 5”.

No “Estado 5”, o protocolo termina, podendo haver ou não um acordo entre os dois agentes. Os agentes terminam a negociação quando ocorrer um dos dois casos seguintes: (i) quando os valores dos preços limite de um agente são ultrapassados e por essa razão o agente decide não continuar a negociar, (ii) ou então quando os agentes chegam a um acordo.

4.3.2 Representação segundo o modelo da FIPA

A Figura 4.8 apresenta o protocolo proposto neste trabalho representado através do esquema do *Request Interaction Protocol* da FIPA.

O protocolo inicia-se com o agente ag_c (iniciador) a enviar uma mensagem de pedido de proposta ao agente ag_v (participante). O agente ag_v responde enviando a sua proposta inicial. Posteriormente o agente ag_c recebe a proposta inicial e escolhe uma das seguintes opções: (i) termina a negociação; (ii) aceita a proposta recebida; (iii) envia uma contraproposta ao agente ag_v . Se o agente ag_c optar por enviar uma contraproposta, o agente ag_v recebe essa contraproposta e tem que optar por uma das seguintes opções: (i) termina a negociação; (ii) aceita a proposta recebida; (iii) envia uma contraproposta ao agente ag_c .

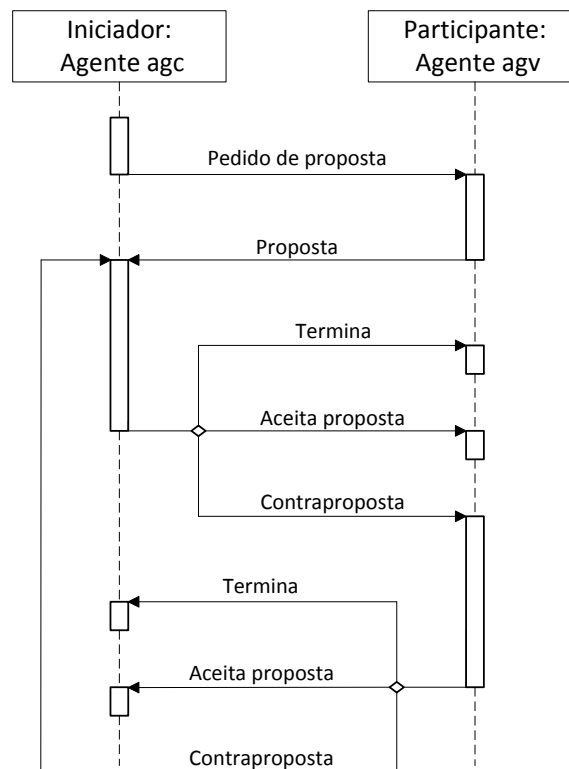


Figura 4.8 – Protocolo de ofertas alternadas proposto.

Os agentes trocam propostas e contrapropostas até atingirem um acordo (uma das propostas ser aceite por um dos agentes), ou um dos agentes terminar a negociação.

4.3.3 Descrição do Algoritmo Implementado

Nesta secção descreve-se as partes fundamentais do algoritmo desenvolvido, explica-se como são realizados os pedidos de proposta e como são elaboradas e avaliadas as propostas e contrapropostas trocadas pelos dois agentes.

Depois do envio da mensagem de pedido de proposta $pedprop$, e dos dois agentes iniciarem a negociação, quando um dos agentes recebe uma proposta $prop_{tn}$, e antes de decidir que opção deve executar, inicia o seguinte processo:

1. Avalia a utilidade da proposta recebida $prop_{tn}$;
2. Faz o cálculo de uma contraproposta $prop_{tn+1}$;
3. Avalia a utilidade da contraproposta $prop_{tn+1}$;
4. Compara as utilidades da $prop_{tn}$ e da $prop_{tn+1}$ e decide se envia a contraproposta $prop_{tn+1}$ calculada, ou se aceita a proposta $prop_{tn}$ em função da utilidade mais vantajosa para o agente.

De seguida descreve-se mais pormenorizadamente como são realizadas estas etapas no algoritmo criado.

Por forma a terminar uma simulação de uma negociação computacional limitou-se o programa a um máximo oito propostas enviadas, porque considerou-se que este valor será o valor máximo aceitável numa situação de negociação real. Se um dos agentes contabilizar oito propostas enviadas, e ainda não ter havido um acordo entre os agentes, o programa irá parar a negociação, e enviará uma mensagem para as janelas de cada um dos agentes a informar que o número máximo de propostas foi superior a oito e que por essa razão a negociação termina sem um acordo.

Pedido de proposta

O pedido de proposta *pedprop* é realizado quando o agente ag_c está interessado em negociar preços de energia eléctrica com o agente ag_v , para esse efeito o agente ag_c efectua o envio da mensagem *call for proposal* ao agente ag_v a pedir-lhe uma proposta inicial $prop_{t1}$.

No algoritmo implementado o pedido é realizado da seguinte forma:

```
// Send the call for proposal to seller
ACLMessage cfp = new ACLMessage(ACLMessage.CFP);
for (int i = 0; i < sellerAgents.size(); ++i) {
    cfp.addReceiver((AID)sellerAgents.elementAt(i));
}
```

Propostas

As propostas são constituídas por quatro preços de quatro tarifas distintas e são realizadas quando há um pedido de uma proposta *pedprop* por parte do agente ag_c ou então como resposta a uma proposta recebida. A formulação de uma proposta $prop_{tn}$ e de uma contraproposta $prop_{tn+1}$ a enviar por um agente depende da estratégia adoptada para a negociação. As expressões matemáticas que definem as estratégias de cada um dos agentes são utilizadas para calcular as propostas a enviar.

Na fase actual de desenvolvimento do simulador existe uma estratégia implementada tanto para o agente ag_c como para o agente ag_v . Implementou-se uma estratégia de concessão. Os negociadores que utilizam este tipo de estratégia reduzem as suas aspirações para ceder parcialmente ao adversário [Lopes, 2010], em particular a estratégia implementada inicia a negociação de forma razoável apresentando uma atitude realista e posteriormente concede de forma moderada a cada proposta sucessiva [Lopes et al., 2005]. Neste tipo de estratégia, a formulação das propostas a enviar pelos agentes são determinadas em função das propostas enviadas anteriormente.

Considere-se o preço p_{tn}^k do período k ($k \in [1; 4]$) de uma proposta $prop_{tn}^a$ enviada por um agente a no instante t_n . Considere-se também o preço p_{tn+1}^k do período k da proposta

$prop_{t_{n+2}}^a$ enviada de seguida no instante t_{n+2} pelo mesmo agente. Desta forma a estratégia escolhida para o agente ag_c e para o agente ag_v , e que determina qual o preço de cada período $p_{t_{n+1}}^k$ que constitui uma proposta a enviar, é traduzida pela seguinte expressão matemática:

$$p_{t_{n+1}}^k = p_{t_n}^k + f \times (lim_k - p_{t_n}^k) \quad (2)$$

Sendo a variável lim_k o preço limite definido para cada item (preço) e a variável f o factor de concessão. O factor de concessão define as concessões de cada item, as concessões podem ser divididas em três tipos principais [Lopes, 2010]:

- Concessão grande, em que o $f \in]0,00; 0,005]$;
- Concessão substancial, em que o $f \in]0,05; 0,015]$;
- Concessão pequena, em que o $f \in]0,15; 0,020]$.

Para este trabalho escolheu-se uma concessão do tipo substancial. No algoritmo implementado o cálculo da proposta $prop_{t_{n+1}}$ a enviar pelo agente ag_c é realizado da seguinte forma:

```
//Computed Prices -- Second and Next Proposals
for (int j= 0; j < currentPrice.length; ++j){
    temp1 = Cf[j]*(lim[j] - currentPrice[j]);
    temp2 = currentPrice[j] + temp1;
    currentPrice[j] = temp2;
}
```

Avaliação das propostas

Actualmente o programa faz a avaliação das propostas tendo em conta apenas o parâmetro preço, na secção 6.2 indica-se outros parâmetros que poderão ser avaliados num desenvolvimento futuro do programa.

As avaliações das propostas são realizadas com base nas preferências dos agentes, utilizando para esse efeito o modelo aditivo. Este modelo é o mais utilizado para fazer as avaliações em situações em que é necessário decidir entre vários itens, mas não é adequado para todas as circunstâncias. Em particular, o modelo é inadequado, quando há uma interacção entre os valores dos pesos associados a alguns dos itens (que definem a importância relativa de cada um) ou seja em termos técnicos, para que seja possível aplicarmos o modelo aditivo é necessário assumir que existe independência mútua das preferências entre os itens [Goodwin e Wright, 2004].

No modelo aditivo as avaliações das propostas e contrapropostas de cada agente são determinadas através da função utilidade. Considere-se o conjunto de agentes de negociação $i, (i \in \{a; b\})$ e o conjunto de n itens a negociar em períodos $k, X = \{x_1; x_2; \dots; x_k\}$, considere

ainda a função marginal de um agente i , igual a $V_k^i(x_k)$ e as preferências relativas de cada item de negociação traduzidas pelos respectivos pesos w_k^i , sendo o $\sum_{k=1}^n w_k^i = 1$.

Depois de definir estes parâmetros, é possível avaliar a utilidade de uma função marginal $V_k^i(x_k)$ de um sistema com vários itens de negociação de $X = \{x_1; x_2; \dots; x_k\}$ através dos pesos w_k^i associados a cada item, aplicando a função utilidade $U_i(X)$ [Goodwin e Wright, 2004]:

$$U_i(X) = \sum_{k=1}^n w_k^i \times V_k^i(x_k) \quad (3)$$

Quando um agente recebe uma proposta $prop_{tn}$ e precisa de decidir se aceita a proposta ou se envia uma contraproposta, faz o cálculo da utilidade da proposta $prop_{tn}$ recebida U_{rcv} e posteriormente faz o cálculo da utilidade da contraproposta $prop_{tn+1}$ que poderá enviar U_{cmp} . O programa faz uma comparação das avaliações das utilidades U_{rcv} e U_{cmp} , e no caso do agente ag_v o programa verifica se a avaliação de utilidade U_{rcv} é menor do que a avaliação da utilidade U_{cmp} ($U_{rcv} < U_{cmp}$), se a condição verificar-se o agente ag_v envia a contraproposta $prop_{tn+1}$, caso a condição não se verifique o agente ag_v aceita a proposta $prop_{tn}$.

Na programação implementada o cálculo da utilidade U_{rcv} , da utilidade U_{cmp} e a tomada de decisão de aceitação da proposta $prop_{tn}$ ou de envio da contraproposta $prop_{tn+1}$ pelo agente ag_v é realizado da seguinte forma:

```
//Computing Utilities of received and new Proposals
for (int i= 0; i < tariff_cmp.length; ++i){
    Urcv = Urcv + w[i]*tariff_rcv[i];
    Ucmp = Ucmp + w[i]*tariff_cmp[i];
}
// Test whether to accept or reject proposal
if (Urcv < Ucmp) {
    // Reject received proposal and send counter proposal
    ACLMessage countprp = new ACLMessage (ACLMessage.PROPOSE);
} else {
    // Accept received proposal from the Buyer Agent
    ACLMessage acceptprp = new ACLMessage (ACLMessage.ACCEPT_PROPOSAL);
}
```

4.4 Comunicação entre Agentes

A comunicação é um aspecto fundamental de qualquer plataforma de desenvolvimento de sistemas multi-agente, pois permite estabelecer a interação entre os agentes através de uma linguagem comum.

Na plataforma JADE, a comunicação entre os agentes está de acordo com as especificações da FIPA, garantindo a compatibilidade completa com as especificações da FIPA2000 (comunicação, gestão e arquitectura), que fornecem o quadro normativo em que os agentes podem existir, operar e comunicar [Bellifemine et al., 2007].

A FIPA é uma organização da *IEEE Computer Society*, sem fins lucrativos, que promove o desenvolvimento das tecnologias baseadas em sistemas multi-agente e a sua interoperabilidade com outras tecnologias. Desde a sua fundação, a FIPA tem desempenhado um papel crucial no desenvolvimento da tecnologia baseada em sistemas multi-agente, e tem promovido uma série de iniciativas e eventos que contribuiram para o desenvolvimento da utilização desta tecnologia. Além disso, muitas das ideias criadas e desenvolvidas na FIPA estão ganhando novamente uma importância relevante em novas gerações de tecnologia de Internet e outras tecnologias relacionadas com a comunicação [FIPA, 2011].

A FIPA é baseada em dois pressupostos principais. O primeiro é que o tempo para chegar a um consenso e para completar o modelo não deve ser demorado, e principalmente, não deve agir como um travão ao progresso, devendo agir, em vez disso como um facilitador. O segundo pressuposto é que apenas o comportamento externo dos componentes do sistema devem ser especificados, deixando os detalhes de arquitecturas internas e implementação para os programadores de agentes [Bellifemine et al., 1999]. A Figura 4.9 apresenta de forma esquemática o modelo que faz a gestão dos agentes no JADE (este modelo está de acordo com as normas de existência e operação dos agentes exigidas pela FIPA).

Na plataforma JADE, a comunicação entre os agentes é feita através da troca de mensagens utilizando a linguagem de comunicação, *FIPA Agent Communication Language* (ACL). Uma mensagem na linguagem ACL contém um conjunto de um ou mais parâmetros. O único parâmetro que é obrigatório em todas as mensagens é o performativo, embora seja espectável que a maioria das mensagens também contenha parâmetros respeitantes ao remetente, receptor e conteúdo [Bellifemine et al., 2007].

No software JADE o envio e a recepção de mensagens entre agentes são feitos utilizando a classe *ACLMessage*. Esta classe possui atributos definidos que são utilizados para se referir aos actos comunicativos da FIPA. No programa desenvolvido utilizou-se alguns desses atributos tais como: PROPOSE (para enviar uma proposta); CFP (para enviar um pedido de proposta inicial); ACCEPT_PROPOSAL (para enviar um aviso de aceitação de proposta).

Uma das vantagens da linguagem ACL é a possibilidade de especificar sequências predefinidas de mensagens que podem ser aplicadas em diversas situações que compartilham o mesmo padrão de comunicação, independentemente do domínio de aplicação. Tais sequências de mensagens são conhecidas como protocolos de interacção [Bellifemine et al., 2007].

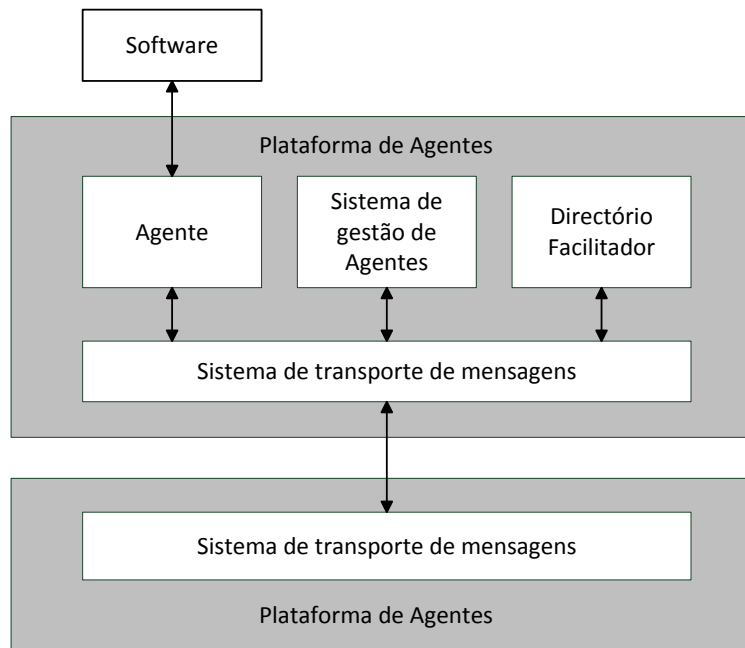


Figura 4.9 — Plataforma de gestão dos agentes definido pela FIPA. Adaptado de [FIPA, 2000].

4.5 Conclusão

No início do capítulo apresentou-se a ferramenta computacional SCBE proposta neste trabalho. Primeiro descreveu-se e explicou-se como deve ser realizada a utilização da interface do SCBE, e posteriormente fez-se uma descrição do protocolo de ofertas alternadas desenvolvido no simulador. Descreveu-se o protocolo de ofertas alternadas utilizando duas representações diferentes, primeiro através de um diagrama de estados com seis estados possíveis, e de seguida apresentou-se o protocolo utilizando o esquema do *Request Interaction Protocol* da FIPA.

Neste capítulo também descreveu-se como foram implementadas algumas das partes essenciais do algoritmo do protocolo de ofertas alternadas, tais como: o pedido da proposta inicial realizado pelo agente comprador, a formulação das propostas e contrapropostas, e a avaliação da utilidade das propostas.

Além da descrição do SCBE, neste capítulo apresentou-se ainda os principais aspectos sobre a linguagem de comunicação FIPA ACL (*Agent Communication Language*), utilizada para realizar a comunicação entre os agentes na plataforma computacional JADE. Apresentou-se também algumas características sobre a organização FIPA e referiu-se algumas recomendações exigidas por esta organização para realizar a implementação de agentes.

Capítulo 5

Caso de Estudo: Negociação Bilateral no Mercado Retalhista

5.1. Introdução

Para analisar o simulador desenvolvido, descreve-se neste capítulo um caso de estudo referente a uma contratação bilateral no mercado retalhista. O caso de estudo tem como base valores de preços e de volumes de energia de uma contratação real no mercado de retalho, entre um retalhista (comercializador) e uma empresa do sector dos serviços (consumidor). O contrato envolve quatro tarifas do tipo DSM (Gestão da Procura de Energia) e tem a duração de seis meses.

As tarifas DSM permitem uma gestão da procura de carga por parte do consumidor de electricidade. Estas tarifas incentivam a transferência de consumos dos períodos em que há maior procura de energia para os períodos em que existe menor procura por parte dos consumidores. O incentivo é dado através da oferta de preços mais baixos para os períodos de menor consumo.

O consumidor recebe a energia em média tensão, com uma potência contratada de 1321 kW e uma potência instalada de 1890 kW. Os volumes de energia consumidos durante um período de seis meses foram determinados através de uma estimativa de consumos da empresa, considerando os consumos durante o primeiro e quarto trimestres do ano (horário de Inverno). A Tabela 5.1 apresenta os valores dos preços e volumes de energia para o período de seis meses.

	Preços (€/MWh)	Volumes (MWh)
Horas de ponta	54,90	1130
Horas de cheia	50,30	2023
Horas de vazio normal	46,60	429
Horas de super vazio	39,90	567

Tabela 5.1 — Preços e volumes de energia de uma contratação bilateral real.

O caso de estudo usado para realizar a simulação consiste numa negociação entre um agente retalhista, que denominamos por Energia Universal, e um agente consumidor do sector dos serviços, que denominados por Business & Services Center. Os dois agentes negociam a contratação de quatro tarifas do tipo DSM para quatro períodos diferentes do diagrama de carga do consumidor do sector dos serviços: o período de ponta, o período de cheia, o período de vazio normal e o período de super vazio.

O consumidor está interessado em comprar electricidade ao retalhista, efectuando um pedido de proposta, ao qual o retalhista responde enviando uma proposta inicial. Esta proposta é formada por quatro preços, tendo cada preço um volume de energia associado. Os valores dos parâmetros necessários para realizar a simulação da negociação do comercializador estão indicados na Tabela 5.2. A escolha destes valores teve como base os valores da contratação bilateral real (apresentada anteriormente). A importância relativa de cada período é representada pelo parâmetro peso. O peso de cada período é definido através do quociente do volume de energia de cada período pelo volume total dos quatro períodos (referido na secção 3.3.2).

Caso o consumidor não concorde com a proposta inicial do comercializador, é necessário iniciar uma negociação, por forma aos agentes chegarem a um acordo ou concluírem que não querem um acordo. Deste modo o consumidor apresenta a sua proposta inicial de compra constituída por quatro preços (os parâmetros do consumidor utilizados na negociação estão indicados na Tabela 5.3.) Tal como no caso do comprador, a escolha dos valores dos parâmetros do vendedor também teve como base os valores da contratação bilateral real.

Energia Universal	Preço Inicial (€/MWh)	Limite (€/MWh)	Nível de Aspiração (€/MWh)	Preço Ótimo (€/MWh)	Energia (MWh)	Peso
Período 1	56,98	51,81	53,84	58,90	1130	0,27
Período 2	52,37	47,23	49,27	54,30	2030	0,49
Período 3	48,79	43,52	45,66	50,70	429	0,10
Período 4	41,98	36,81	38,84	43,90	567	0,14

Tabela 5.2 — Parâmetros para a negociação do vendedor.

Business & Services Center	Preço Inicial (€/MWh)	Limite (€/MWh)	Nível de Aspiração (€/MWh)	Preço Ótimo (€/MWh)	Energia (MWh)	Peso
Período 1	52,81	57,98	55,96	50,82	1130	0,27
Período 2	48,23	53,39	51,31	46,27	2030	0,49
Período 3	44,51	49,67	47,65	42,55	429	0,10
Período 4	37,84	42,98	40,97	35,81	567	0,14

Tabela 5.3 — Parâmetros para a negociação do comprador.

A negociação decorre até que os dois agentes negoceiem valores de preços de electricidade que satisfaçam as aspirações de ambos. Naturalmente, o comercializador terá preferência por preços de electricidade mais elevados e o consumidor por preços mais baixos.

5.2. Análise de Resultados

Utilizando os valores da Tabela 5.2 e da Tabela 5.3, fez-se a simulação do caso prático apresentado anteriormente usando o simulador SCBE. Posteriormente, recolheu-se os dados obtidos e procedeu-se à sua análise, tendo em consideração a evolução dos preços e a estratégia utilizada (igual para ambos os agentes). A Tabela 5.4 apresenta os valores das propostas e contrapropostas feitas pelos agentes, até alcançarem um acordo final. Os preços finais estão indicados na tabela a sombreado.

A Figura 5.1 apresenta a evolução do processo negocial e as propostas enviadas pelos agentes até alcançarem um acordo.

Proposta	Agente Vendedor				Agente Comprador			
	Período1 €/MWh	Período2 €/MWh	Período3 €/MWh	Período4 €/MWh	Período1 €/MWh	Período2 €/MWh	Período3 €/MWh	Período4 €/MWh
1 ^a	56,98	52,37	48,79	41,98	52,81	48,23	44,51	37,84
2 ^a	56,46	51,86	48,26	41,46	53,43	48,85	45,13	38,46
3 ^a	56,00	51,39	47,79	41,00	53,98	49,39	45,67	39,00
4 ^a	55,58	50,98	47,36	40,58	54,46	49,87	46,15	39,48
5 ^a	55,20	50,60	46,98	40,20	54,88	50,30	46,58	39,90

Tabela 5.4 — Resultados da simulação do caso prático.

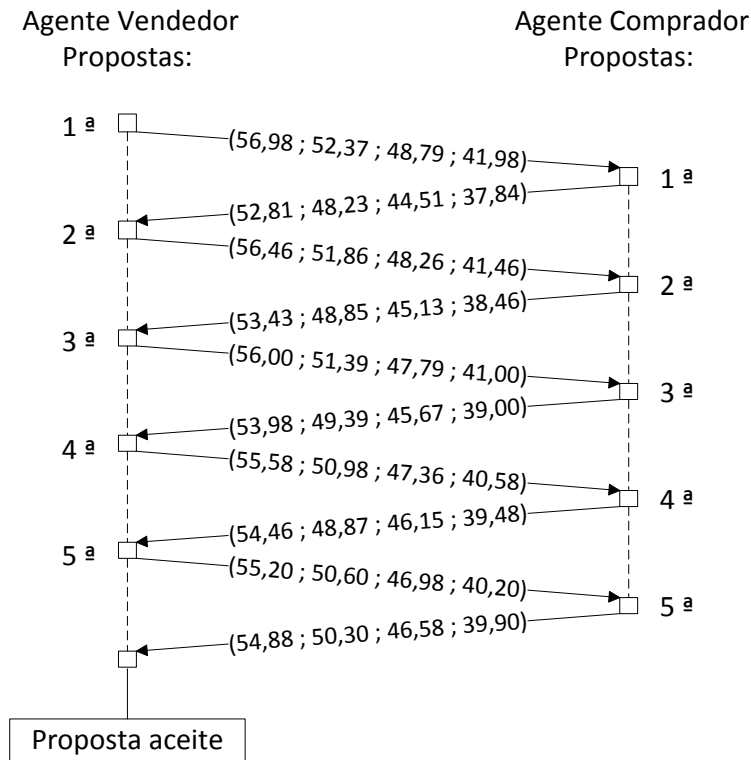


Figura 5.1 — Evolução do processo negocial.

Os agentes alcançaram um acordo após o agente vendedor ter enviado cinco propostas e o agente comprador outras cinco propostas. O agente vendedor iniciou a negociação, através do envio da sua proposta inicial (período 1 = 56,98 €/MWh; período 2 = 52,37 €/MWh; período 3 = 48,79 €/MWh; período 4 = 41,98 €/MWh). A negociação terminou quando o agente vendedor aceitou a quinta proposta do agente comprador (período 1 = 54,88 €/MWh; período 2 = 50,30 €/MWh; período 3 = 46,58 €/MWh; período 4 = 39,90 €/MWh). A Figura 5.2 e a Figura 5.3 apresentam graficamente as evoluções dos preços para cada agente.

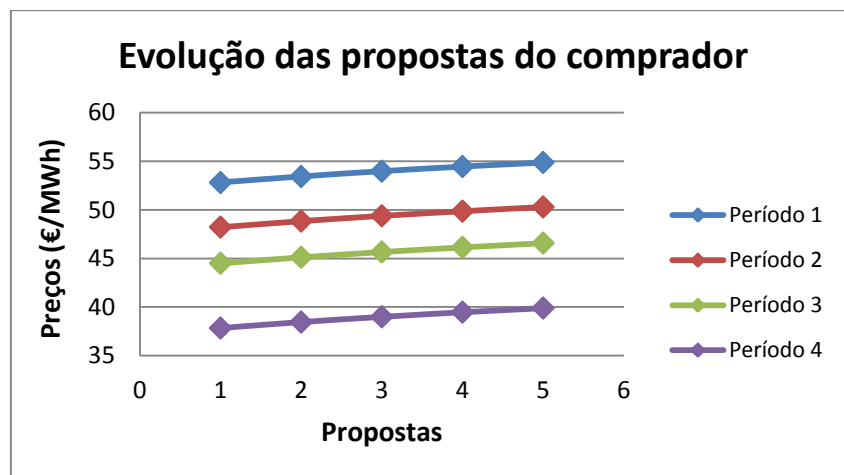


Figura 5.2 — Evolução dos preços das propostas do agente comprador.

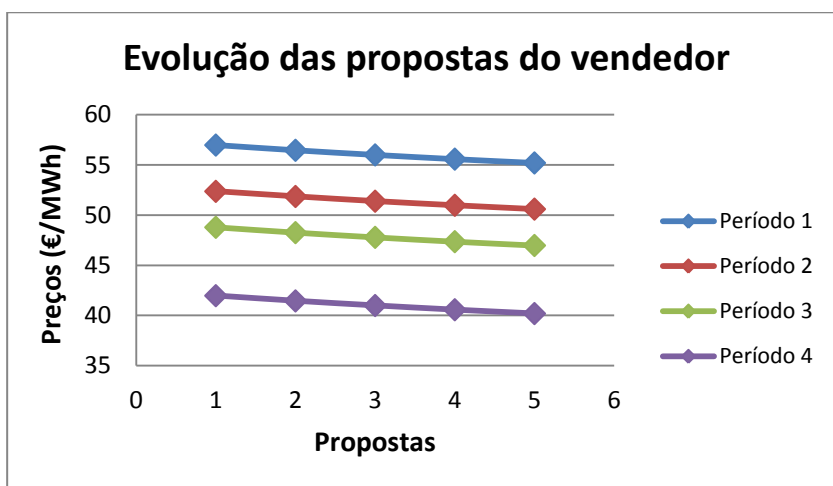


Figura 5.3 — Evolução dos preços das propostas do agente vendedor.

Analisando a Figura 5.2, verifica-se que o agente comprador aumenta gradualmente o preço de cada período em cada proposta submetida. Na Figura 5.3 verifica-se que o agente vendedor tem um comportamento oposto ao do agente comprador. O agente vendedor diminui os preços de cada período em cada proposta submetida. A evolução dos preços das propostas de cada um dos agentes resulta da estratégia de concessão utilizada por ambos.

Na Tabela 5.5, apresentam-se os valores da utilidade do agente vendedor até este agente decidir aceitar a proposta do agente comprador. Como descrito na secção 4.3.3, antes de os agentes decidirem se aceitam uma proposta ou enviam uma contraproposta, fazem uma avaliação da utilidade associada à proposta recebida e outra avaliação à potencial contraproposta a enviar. Posteriormente comparam esses dois valores e decidem qual a opção mais vantajosa.

Observando a Tabela 5.5, verifica-se que a utilidade da sexta proposta a enviar pelo agente vendedor (assinalado a sombreado) é menor do que a utilidade da quinta proposta recebida. Por esta razão, o agente decide não enviar uma nova proposta e aceita a última proposta recebida. A Figura 5.4. apresenta uma representação gráfica da evolução das utilidades das propostas recebidas e enviadas pelo agente vendedor.

Utilidades	1 ^a Proposta	2 ^a Proposta	3 ^a Proposta	4 ^a Proposta	5 ^a Proposta	6 ^a Proposta
Propostas recebidas	47,64	48,26	48,80	49,28	49,71	50,08
Propostas Enviadas	51,80	51,29	50,82	50,40	50,02	49,69

Tabela 5.5 — Utilidades das propostas enviadas e recebidas pelo agente vendedor.

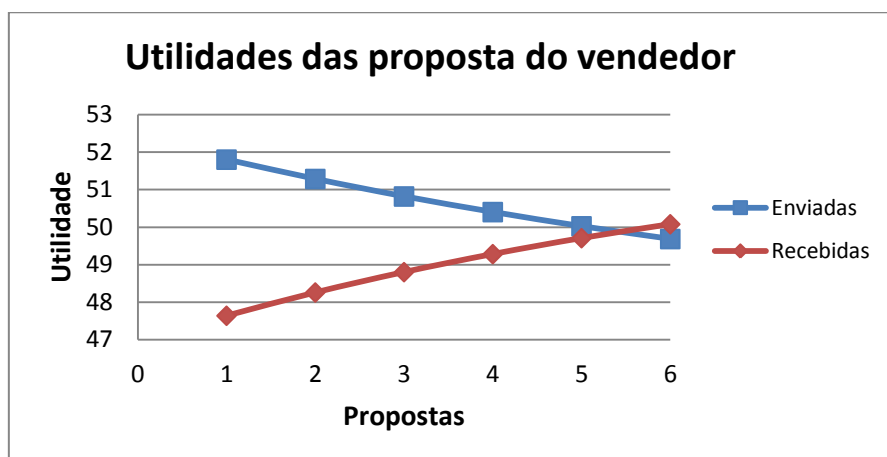


Figura 5.4 — Utilidades das propostas recebidas e enviadas pelo agente vendedor.

Na estratégia de concessão adoptada por ambos os agentes para simular o presente caso de estudo, os agentes concedem progressivamente, ou seja diminuem/aumentam gradualmente os preços (consoante o caso de vendedor/comprador). Tendo em conta este facto e analisando a Figura 5.4, verifica-se que a partir do momento em que a utilidade da contraproposta a enviar pelo agente vendedor é menor do que a utilidade da proposta recebida, o agente decide aceitar a proposta recebida. Em termos práticos, quando a utilidade do conjunto de preços recebidos é mais vantajosa (maior) do que a utilidade do conjunto de preços que o agente vendedor iria propor ao agente comprador, ele decide aceitar a proposta. Neste caso em estudo, esta situação aconteceu na quinta proposta recebida pelo agente vendedor (como referido anteriormente).

Analisando os resultados obtidos na simulação, verifica-se que os valores dos preços acordados pelos dois agentes são bastante próximos dos valores do contrato real utilizado como base para desenvolver o caso de estudo deste trabalho (ver Tabela 5.6). Por esta razão, e tendo em conta o âmbito do presente caso de estudo, considera-se que o simulador atingiu os seus objectivos como ferramenta que permite simular uma negociação em contratos bilaterais para aquisição de energia eléctrica.

	Preços finais da simulação (€/MWh)	Preços do contrato real (€/MWh)
Horas de ponta	54,88	54,90
Horas de cheia	50,30	50,30
Horas de vazio normal	46,58	46,60
Horas de super vazio	39,90	39,90

Tabela 5.6 — Comparação entre os valores da simulação e do contrato real.

Capítulo 6

Conclusão

Descreve-se abaixo o grau de realização atingido para os principais objectivos enunciados inicialmente e discutem-se vários tópicos a considerar no desenvolvimento futuro.

6.1 Principais Aspectos

A liberalização do sector eléctrico levou à passagem de regimes de monopólio a mercados liberalizados, o que permitiu dar liberdade aos consumidores de energia na escolha do seu fornecedor e provocou um aumento da competitividade no sector eléctrico, pressionando as empresas que nele actuam a serem mais competitivas e a proporem preços mais baixos de forma a ganharem cota de mercado.

O sector eléctrico é constituído por várias actividades, das quais se destacam as cinco principais: produção, transporte, distribuição, comercialização e operação de mercados. Estas actividades são assumidas por diversos agentes intervenientes. Na produção participam os produtores de energia, no transporte o operador de sistema, que é o responsável pela gestão técnica e económica de rede de transporte, na distribuição intervêm as empresas distribuidoras, na comercialização actuam os comercializadores e os consumidores que pretendem contratar energia, e na operação de mercados actua o operador de mercado, que é a entidade responsável pela gestão da bolsa de energia, pela definição do preço de mercado e pelas contratações realizadas em bolsa.

Os mercados de energia liberalizados podem ser divididos em dois grandes grupos, dependendo da sua forma de comercialização de energia: do tipo grossista ou retalhista. No mercado grossista, actuam os produtores de energia que assumem um papel de vendedor e os retalhistas que assumem um papel de comprador. A comercialização pode ser feita através de uma bolsa de energia ou através de contratos bilaterais físicos. No mercado retalhista, actuam os retalhistas (que compraram a energia no mercado grossista e vendem no mercado a

retalho) e os consumidores (que compram energia aos retalhistas). A comercialização é feita através de contratos bilaterais de electricidade.

A tecnologia baseada em agentes tem sido utilizada para desenvolver simuladores de mercados de energia eléctrica. A capacidade desta tecnologia para modelar sistemas reais, considerando aspectos sociais, ambientais e económicos, prova que é uma ferramenta adequada para a modulação de operações em mercados de electricidade.

Actualmente, existem simuladores de mercados de energia eléctrica que permitem simular a contratação de electricidade utilizando transacções em bolsas de energia e contratos bilaterais, e analisar tecnicamente a rede de energia para verificar, por exemplo, situações de congestionamento ou para elaborar despachos económicos. Neste trabalho, analisou-se e comparou-se alguns dos simuladores mais importantes, como por exemplo os simuladores EMCAS, AMES e MASCEM.

O objectivo principal desta dissertação foi a criação de uma ferramenta computacional baseada num protocolo de interacção, que permite a troca alternada de propostas de preços, numa negociação entre dois agentes computacionais, referente a um contrato bilateral de electricidade num mercado de energia eléctrica liberalizado.

Para implementar a ferramenta computacional, recorreu-se à linguagem de programação Java e à plataforma de desenvolvimento de sistemas multi-agente JADE, onde além do protocolo de ofertas alternadas, também se desenvolveu uma interface, e implementou-se uma estratégia de concessão.

Na plataforma JADE, a comunicação entre os agentes é realizada segundo as normas do protocolo de comunicação da FIPA. Os agentes comunicam enviando e recebendo mensagens codificadas na linguagem de comunicação da FIPA, a *Agent Communication Language* (ACL).

Nesta dissertação, deu-se um destaque particular aos contratos bilaterais realizados no mercado retalhista. Para realizar uma simulação através do simulador desenvolvido e posteriormente analisar os resultados obtidos, criou-se um caso de estudo com base em valores reais de preços de venda de energia eléctrica no mercado de retalho, e determinou-se os volumes de energia consumidos através de uma estimativa de consumo de um consumidor do sector dos serviços.

O caso de estudo consistiu numa negociação entre um retalhista e um consumidor do sector dos serviços sobre um contrato bilateral de electricidade, com quatro tarifas (tarifas de vazio normal, super vazio, cheia e ponta) e com uma duração de seis meses.

Na análise dos resultados obtidos na simulação verificou-se um comportamento espectável por parte do agente comprador e do agente vendedor, em função da estratégia implementada (estratégia de concessão). O agente comprador concedeu de forma progressiva, aumentando gradualmente os preços das suas propostas, e o agente vendedor também se comportou de igual modo, diminuindo os preços das suas ofertas. O acordo ocorreu quando o

agente vendedor verificou que a utilidade da sexta proposta que iria enviar era menor do que a utilidade da proposta que tinha recebido anteriormente (quinta proposta enviada pelo agente comprador).

A ferramenta desenvolvida neste trabalho permite simular uma negociação entre dois agentes do mercado de energia eléctrica, tornando-se por essa razão uma ferramenta com potencial para a preparação de uma negociação real. Considera-se assim que o simulador desenvolvido permite apoiar a tomada de decisões dos intervenientes em contratos bilaterais de electricidade.

6.2 Desenvolvimento Futuro

Como trabalho futuro, propõe-se a implementação de mais opções na interface e torná-la mais interactiva. Na interface podem ser implementados alguns aspectos, como “menus”, opções para mais soluções tarifárias, evoluções gráficas das propostas efectuadas, ou opções para poder-se guardar os resultados da simulação em ficheiros exteriores ao programa.

Actualmente, o programa tem um modelo implementado para avaliar as preferências de cada agente. O modelo implementado é o modelo aditivo. Considera-se interessante a implementação de mais modelos para permitir uma maior diversidade nas simulações.

Outro ponto importante, para o desenvolvimento futuro, consiste na implementação de mais estratégias para os agentes. Actualmente, o programa tem implementado uma estratégia de concessão que avalia o parâmetro preço. É importante o desenvolvimento de estratégias que relacionem outros parâmetros além do preço, como por exemplo os volumes de energia e a duração do contrato. O desenvolvimento de mais estratégias para os agentes comprador e vendedor que negociam contratos bilaterais de electricidade, está a ser efectuado noutras dissertações de mestrado também realizadas no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Para permitir uma simulação mais próxima de uma situação real, também pode ser desenvolvida uma ligação a um operador de sistema, que verificará a viabilidade técnica (as limitações da rede de transporte) do acordo comercial obtido na contratação bilateral, e indicará se essa contratação é possível ou não. No entanto, para que esta verificação seja possível é importante que haja no programa informação sobre os elementos de uma rede de energia constituída por cargas, linhas, barramentos, e algoritmos que permitam a análise do trânsito de potências da rede.

Outro desenvolvimento possível é a criação da opção de simulação para outros tipos de mercado além dos contratos bilaterais, como por exemplo criar um modelo para realizar a simulação de contratações numa bolsa de energia (simétrica e/ou assimétrica), e implementá-lo conjuntamente com o modelo de contratos bilaterais para formar um mercado de energia híbrido.

Referências

- [Azevedo, 2002] Azevedo, F., “Apoio à Decisão para o Estabelecimento de Contratos no Mercado Competitivo da Electricidade”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Dezembro de 2002.
- [Azevedo, 2007] Azevedo, F. “Gestão do Risco em Mercados Competitivos de Electricidade: Previsão de Preços e Optimização do Portfolio de Contratos”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharias, Área de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Julho de 2007.
- [Bellifemine et al., 2007] Bellifemine, F., Caire, G. e Greenwood, D., “Developing Multi-Agent Systems with JADE”, John Wiley & Sons, 2007.
- [Bellifemine et al., 1999] Bellifemine, F., Caire, G. e Greenwood, D., “JADE – A FIPA-compliant agent framework”, The Practical Application Company Ltd, 1999.
- [Bellifemine et al., 2001] Bellifemine, F., Poggi, A. e Rimassa, G., “Developing Multi-agent Systems with JADE”, Springer, 2001.
- [Cheyer e Martin, 2001] Cheyer, A. e Martin, D., “The Open Agent Architecture” Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [CMVM, 2009] CMVM, ERSE, CNMV e CNE, “Descrição do Funcionamento do MIBEL”, Novembro de 2009.
- [Conzelmann et al., 2005] Conzelmann, G., Boyd, G., Koritarov, V. e Veselka, T., “Multi-Agent Power Market Simulation using EMCAS”, Argonne National Laboratory, IEEE, 2005.
- [Directiva 2009/72/CE, 2009] Directiva 2009/72/CE do Parlamento Europeu e do Conselho “que estabelece regras comuns para o mercado interno da electricidade e que revoga a Directiva 2003/54/CE”, de 13 de Julho de 2009.
- [EDP(a), 2011] EDP(a), “Gestão de energia em ambiente de mercado”, Cie³ - Seminários de Energia – Mercados de Energia e Ambientais, Lisboa, 31 de Março de 2011.
- [EDP(b), 2011] EDP(b) - Serviço Universal, <http://www.edpsu.pt>.
- [ERSE, 2010] ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, Tarifas e Preços para a Energia Eléctrica e Outros Serviços em 2011, Dezembro 2010.

- [ERSE, 2011] ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, <http://www.erse.pt>.
- [Ferreira, 2007] Ferreira, M., “Tarifação da Transmissão e Gestão do Congestionamento em Sistemas Eléctricos Liberalizados”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharias, Área de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Janeiro de 2007.
- [FIPA, 2011] FIPA – The Foundation for Intelligent Physical Agents, <http://www.fipa.org>.
- [FIPA, 2000] FIPA, “FIPA Agent Management Specification”, The Foundation for Intelligent Physical Agents, Geneva, Switzerland, 2000.
- [Goodwin e Wright, 2004] Goodwin, P. e Wright, G., “Decision Analysis for Management Judgment”, Third Edition, John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [Gomes, 2007] Gomes, M., “Novos Mecanismos de Mercado de Energia Eléctrica e de Serviços Auxiliares em Sistemas Eléctricos”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Janeiro de 2007.
- [JADE, 2011] JADE – Java Agent Development Framework, <http://jade.tilab.com>.
- [Jennings et al., 1998] Jennings, N., K. Sycara e M. Wooldridge (1998), “A Roadmap of Agent Research and development”, Autonomous Agent and Multi-agent Systems, 1, pp. 7-38, 1998.
- [Kirschen e Strbac, 2004] Kirschen, D., and Strbac, G., “Fundamentals of Power System Economics”, University of Manchester Institute of Science & Technology (UMIST), John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [Landaburu, 2006] Landaburu, P., “Optimal Allocation and Scheduling of Demand in Deregulated Energy Markets”, PhD. Thesies, Faculty of informatics, Viena University of Tecnology, Vienna, Austria, 2006.
- [Lopes, 2004] Lopes, F., “Negociação entre Agentes Computacionais Autónomos”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Outubro de 2004.
- [Lopes, 2008] Lopes, F., Wooldridge, M. and A.Q. Novais, “Negotiation among autonomous computational agents: principles, analysis and challenges”, Artificial Intelligence Review, 29, pp. 1-44, 2008.
- [Lopes, 2005] Lopes, F., Novais, A.Q., Mamede, N. and Coelho, H., “Negotiation Among Autonomous Agents: Experimental Evaluation of Integrative Strategies”, IEEE, 2005.

- [Lopes, 2009] Lopes, F., S. Fátima and M. Wooldridge, “Pre-Negotiation and Impasses in Automated Negotiation”, Group Decision and Negotiation (Submitted, 2009).
- [Lopes, 2010] Lopes, F., J. Sousa and H. Coelho, “Negotiation and Risk Management in Multi-Agent Energy Markets”, Relatório Interno, LNEG, 2010.
- [Marques, 2008] Marques, P., “Simulador Multi-Agente Para O Mercado Eléctrico”, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Electrónica e Telecomunicações e de Computadores, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Novembro de 2008.
- [Martin et al., 1999] Martin, D., Cheyer, A. e Moran, D., “The Open Agent Architecture: A Framework for Building Distributed Software Systems”, 1999.
- [Martins, 2009] Martins, A., “Mercado Ibérico de Electricidade — Simulação de um Modelo em Concorrência Perfeita”, Tese de Mestrado, Faculdade de Economia, Universidade do Porto, Dezembro 2009.
- [North et al., 2006] North, M., Collier, N. e Vos, J., “Experiences Creating Three Implementations of the Repast Agent Modeling Toolkit”, Argonne National Laboratory, 2006.
- [North et al., 2007] North, M., Tataru, E., Collier, N. e Ozik, J., “Visual Agent-Based Model Development with Repast Symphony”, Argonne National Laboratory, 2007.
- [Oliveira et al., 2009] Oliveira, P., Pinto, T., Morais, H., Vale, Z. e Praça, I., “MASCEM – An Electricity Market Simulator providing Coalition Support for Virtual Power Players”, Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP '09. 15th International Conference, Novembro 2009.
- [OMIP, 2011] OMIP – Operador do Mercado Ibérico de Energia, Pólo Português, <http://www.omip.pt>.
- [OMEL, 2011] OMEL – Operador do Mercado Ibérico de Energia, Pólo Espanhol, <http://www.omel.es>.
- [Oo, 2005] Oo, N., “Multi-Energy Retail Market Simulation with Autonomous Intelligent Agents”, PhD. Theses, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, December 2005.
- [Paiva, 2007] Paiva, J., “Redes de Energia Eléctrica: uma análise sistemática”, IST Press, Dezembro de 2007.
- [Pedras, 2006] Pedras, R., “Mercado Ibérico de Electricidade — A Regulação do MIBEL e Perspectivas de Evolução”, Seminário APOCEEP, Dezembro de 2006.

- [Pereira, 2004] Pereira, I., “Sistema Multi-Agente para Apoio à Negociação em Mercados de Electricidade”, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharias, Área de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-Montes E Alto Douro, Vila Real, Novembro de 2004.
- [Praça et al., 2007] Praça, I., Morais, H., Cardoso, M., Ramos, C., e Vale, Z., “Virtual Power Producers Integration Into MASCEM”, Springer, pp. 291–298, 2007.
- [Rahimi-Kian, 2006] Rahimi-Kian, A., Kebriaei, H., Mahan, F., “An Agent-based Negotiation Method for Bilateral Contracts of Energy”, IEEE, 2006.
- [Ramos, 2006] Ramos, S., “Utilização de Técnicas de *Data Mining* para Apoio aos Agentes dos Mercados Retalhistas de Energia Eléctrica”, Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Junho de 2006.
- [REN, 2011] REN – Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A., <http://www.ren.pt>.
- [Rudnick e Zolezzi, 2001] Rudnick, H. e Zolezzi, J., “Electric sector deregulation and restructuring in Latin America: lessons to be learnt and possible ways forward”, IEE, Março de 2001.
- [Russell e Norvig, 2003] Russel, S. e P. Norvig, “Artificial Intelligence a Modern Approach”, Prentice Hall, 2003.
- [Santana, 2004] Santana, J., “A Concorrência no Sector Eléctrico”, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.
- [Shahidehpour et al., 2002] Shahidehpour, M., Yamin, H. e Li, Z., “Market Operations in Electric Power Systems Forecasting, Scheduling, and Risk Management”, IEEE, John Wiley & Sons Publication, 2002.
- [Simão, 2009] Simão, T., “Pricing Renewable Energy in a Competitive Electricity Market”, Tese de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Outubro de 2009.
- [Simões, 2011] Simões, J., “Os desafios da regulação”, Cie³ - Seminários de Energia - Regulação do Sector Energético, Lisboa, 24 de Fevereiro de 2011.
- [Sousa, 2005] Sousa, J., “Integração de mercados liberalizados de energia eléctrica com aplicações ao MIBEL”, Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Economia, Lisboa, Maio 2005.
- [Stoft, 2002] Stoft, S., “Power System Economics – Designing Markets for Electricity”, IEEE Press, John Wiley & Sons, 2002.

- [Vale et al., 2011] Vale, Z., Pinto, T., Praça, I., Morais, H., “MASCEM: Electricity Markets Simulation with Strategic Agents”, IEEE Computer Society, 2011.
- [Wooldridge, 2009] Wooldridge, M., “MultiAgents Systems”, John Willey and Sons, 2009.
- [Wooldridge e Jennings, 1995] Wooldridge, M. e N. Jennings, “Intelligent Agents: Theory and Practice”, Knowledge Engineering Review, 10, pp. 115-152, 1995.
- [Zhou et al., 2009] Zhou, Z., Chan, W. and Chow, J., “Agent-based simulation of electricity markets: a survey of tools”, Springer Science, 2009.

