



**Diogo Simões Figueiredo Vidigal**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica  
e de Computadores

**Comercialização de Energia em Mercados em  
Bolsa: Simulador Multi-agente e Análise do  
Impacto da Geração Variável nos Preços Diários**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientador: Doutor Fernando Jorge Ferreira Lopes, Investigador,  
Laboratório Nacional de Energia e Geologia

Co-orientadora: Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto,  
Professor Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente: Doutor João Miguel Murta Pina  
Arguente: Doutor João José Esteves Santana  
Vogal: Doutor Fernando Jorge Ferreira Lopes



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro, 2015**



## **Comercialização de Energia em Mercados em Bolsa: Simulador Multi-agente e Análise do Impacto da Geração Variável nos Preços Diários**

Copyright © Diogo Simões Figueiredo Vidigal, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Este documento foi gerado utilizando o processador (pdf)  $\text{\LaTeX}$ , com base no template “unlthesis” [1] desenvolvido no Dep. Informática da FCT-NOVA [2]. [1] <https://github.com/joaomlorenco/unlthesis> [2] <http://www.di.fct.unl.pt>



## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos sem os quais não se teria tornado realidade e aos quais estarei eternamente grato.

Ao Doutor Fernando Lopes, pela sua orientação, disponibilidade, opiniões e críticas. As suas recomendações foram fundamentais para a elaboração da presente dissertação.

À Professora Anabela Pronto, pela sua orientação, por me ter dado a oportunidade de realizar este trabalho, pela sua disponibilidade, apoio e conhecimentos partilhados, não só durante a dissertação como também nos anos em que foi minha professora.

Ao Laboratório Nacional de Energia e Geologia, agradeço por me ter recebido e disponibilizado as suas instalações para o desenvolvimento do meu trabalho.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pelas instalações que me permitiram trabalhar ao longo dos últimos anos e aos docentes, pela participação e colaboração ao longo de todo o percurso académico.

Ao meu ilustre amigo Ali Saad pelas longas noites de estudo, pelas discussões e, principalmente, pelo enorme companheirismo. Agradeço também a todos os restantes amigos e colegas que não menciono o nome mas que sabem quem são.

Agradeço a uma das pessoas mais importantes da minha vida pela amizade incondicional, partilha, dedicação e suporte, a minha namorada, Carla Mourato, obrigado por estares sempre presente.

Por último, tendo consciência que sozinho nada disto teria sido possível alcançar, um agradecimento especial aos meus pais, Alberto Vidigal e Maria Clarinda Figueiredo, por serem os modelos de coragem, dedicação e superação. Ao meu irmão, Guilherme Vidigal, pela amizade, força e ajuda na superação dos obstáculos. A eles dedico este trabalho!



## RESUMO

---

O processo de reestruturação do setor elétrico deu origem à criação de diferentes estruturas de mercado, tendo como objetivo o aumento da competitividade e eficiência. Atualmente, a comercialização de energia elétrica pode ser realizada com recurso a mercados em bolsa ou através da celebração de contratos bilaterais. Sendo o mercado em bolsa caracterizado por uma forte volatilidade de preços, e considerando a atribuição de incentivos para o crescimento da geração renovável não controlada, revela-se importante analisar o impacto de níveis elevados de energia eólica sobre os preços do mercado diário.

Neste contexto, a presente dissertação tem como principais objetivos estudar e implementar os algoritmos de preço marginal único e preço marginal local, normalmente utilizados no mercado em bolsa, bem como dotar o simulador multi-agente MANREM com um módulo para simular os mercados diário e intradiário, e analisar o impacto de níveis elevados de energia eólica sobre os preços do mercado diário.

O estudo detalhado de um caso prático e os resultados obtidos com recurso ao simulador multi-agente permitiram replicar, em computador, o impacto esperado, sendo possível observar uma redução de preços e uma alteração dos compromissos de produção dos produtores convencionais. O estudo contemplou a simulação do mercado diário com recurso aos algoritmos de preço marginal único e preço marginal local, podendo constatar-se que a ferramenta multi-agente constitui um auxiliar importante à tomada de decisão nos mercados de eletricidade.

**Palavras-chave:** Mercados de energia elétrica, sistemas multi-agente, mercado em bolsa, preço marginal único, preço marginal local, energia eólica e impacto no mercado diário.

---



## ABSTRACT

---

The restructuring process of the power sector led to the creation of different market structures, aiming to increase its competitiveness and efficiency. Currently, the electricity trade may be performed via stock exchange markets or through bilateral contracts. Knowing that the stock market is characterized by a strong price volatility, and considering the granting of incentives for the growth of variable generation, is important to analyze the impact of high levels of wind energy on the daily market prices.

In this context, the aim of this thesis is to study, implement and test two different algorithms often used on the stock exchange market, namely the system marginal price (SMP) and the locational marginal price (LMP), providing the multi-agent simulator MANREM with a module to simulate both the day-ahead market and the intraday market. This thesis also aims to analyze the impact of a high penetration of wind energy on the day-ahead market prices.

The results generated by the agent-based simulation platform indicate that the price reduction is considerable. As expected, a high penetration of variable generation as wind power culminates on a reduction of the power commitments for conventional producers. The price reduction effects also creates savings for the demand side by reducing the producers revenue. The multi-agent simulation platform has proven to be an important tool to aid decision making on liberalized electricity markets.

**Keywords:** Electricity markets, multi-agent systems, day-ahead market, system marginal price, locational marginal price, impact of wind generation on market prices.

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e Motivações . . . . .	2
1.2 Principais Objetivos . . . . .	3
1.3 Contribuições . . . . .	4
1.4 Estrutura de Dissertação . . . . .	5
<b>2 Mercados de Energia Elétrica e Sistemas Multi-Agente</b>	<b>7</b>
2.1 Fundamentos de Mercados Económicos . . . . .	8
2.1.1 Modelo de Oferta e Procura . . . . .	8
2.1.2 Equilíbrio de Mercado . . . . .	9
2.1.3 Elasticidade da Procura ao Preço . . . . .	10
2.2 Mercados de Energia Elétrica (MEEs) . . . . .	11
2.2.1 Reestruturação do Setor Elétrico . . . . .	11
2.2.2 Mercado em Bolsa ou <i>Spot</i> . . . . .	13
2.2.2.1 Mercado Diário . . . . .	15
2.2.2.2 Mercado Intradário . . . . .	18
2.2.3 Contratação Bilateral . . . . .	20
2.2.4 Modelo Misto . . . . .	20
2.3 Sistemas Multi-Agente e Plataformas Computacionais . . . . .	21
2.3.1 Sistemas Multi-Agente (SMA) . . . . .	21
2.3.2 SMA - Plataformas Computacionais . . . . .	22
2.3.2.1 JADE . . . . .	22
2.3.2.2 REPAST . . . . .	23
2.3.2.3 OAA . . . . .	23
2.4 Simuladores Multi-Agente de Mercados de Energia . . . . .	23
2.4.1 AMES . . . . .	24

2.4.2	EMCAS . . . . .	26
2.4.3	MASCEM . . . . .	27
2.4.4	NEMSIM . . . . .	28
2.4.5	SEPIA . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Simulador de Mercados de Energia Elétrica (SIMEEL)</b>	<b>31</b>
3.1	Interface Gráfica Principal . . . . .	33
3.1.1	Menu Agentes . . . . .	34
3.1.2	Menu Mercados . . . . .	34
3.1.2.1	Mercado diário . . . . .	35
3.1.2.2	Mercado Intradiário . . . . .	37
3.1.3	Menu Participantes . . . . .	38
3.1.4	Menu Simulação . . . . .	40
3.2	Algoritmos de cálculo de preços de mercado . . . . .	42
3.2.1	Preço marginal único (SMP) . . . . .	42
3.2.2	Preço marginal local (LMP) . . . . .	42
3.3	Interface gráfica — Visualização de resultados . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Caso de Estudo</b>	<b>45</b>
4.1	Introdução . . . . .	46
4.2	Agentes Produtores de Energia . . . . .	46
4.3	Agentes Comercializadores (Retalhistas) . . . . .	51
4.4	Cenários I e II: Estrutura de Ofertas Simples . . . . .	53
4.4.1	Descrição dos Cenários . . . . .	53
4.4.2	Análise de Resultados . . . . .	54
4.5	Cenários III e IV: Estrutura de Ofertas Complexas . . . . .	58
4.5.1	Descrição dos Cenários . . . . .	58
4.5.2	Análise de Resultados . . . . .	59
4.6	Principais Conclusões . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Conclusões e Desenvolvimento Futuro</b>	<b>67</b>
5.1	Síntese de Resultados . . . . .	68
5.2	Desenvolvimento Futuro . . . . .	69
	<b>Bibliografia</b>	<b>71</b>
<b>A</b>	<b>Caso de Estudo: Cenários I e II — Agentes Produtores</b>	<b>75</b>
<b>B</b>	<b>Caso de Estudo: Cenários III e IV — Agentes Produtores</b>	<b>79</b>

<b>C Caso de Estudo: Cenários I e II — Agentes Retalhistas</b>	<b>85</b>
<b>D Caso de Estudo: Cenários III e IV — Agentes Retalhistas</b>	<b>91</b>



## LISTA DE FIGURAS

2.1	Ponto de equilíbrio entre oferta e procura [14] . . . . .	9
2.2	Mercado elétrico com estrutura vertical [1] . . . . .	13
2.3	Modelo de exploração do setor elétrico em mercado <i>spot</i> [1] . . . . .	14
2.4	Modelo de oferta e procura para o mercado diário . . . . .	15
2.5	Processo de formação de preço no mercado diário [19] . . . . .	16
2.6	OMIE - <i>Market splitting</i> no mês de Julho, 2015 [22] . . . . .	17
2.7	Mercado intradiário - Distribuição das seis sessões diárias . . . . .	18
3.1	SIMEEL - Janela principal do simulador . . . . .	32
3.2	Janelas de introdução de dados para a criação de agentes . . . . .	34
3.3	Escolha do algoritmo para cálculo de preço de mercado . . . . .	35
3.4	Definição do número de nós e ligações da rede elétrica — algoritmo LMP . . . . .	36
3.5	Definição das características das ligações na rede — algoritmo LMP . . . . .	36
3.6	Escolha do método de cálculo do preço para o mercado intradiário . . . . .	37
3.7	Janela global para criação de ofertas dos agentes — algoritmo SMP . . . . .	38
3.8	Janelas para introdução de ofertas — algoritmo SMP . . . . .	39
3.9	Janela global para introdução de ofertas — algoritmo LMP . . . . .	40
3.10	Janelas para introdução de ofertas — algoritmo LMP . . . . .	41
3.11	Apresentação de resultados para o mercado diário . . . . .	44
4.1	Curva da oferta por tecnologia de produção [41] . . . . .	47
4.2	Perfis de produção do agente <i>GenCo_WindPower</i> . . . . .	48
4.3	Percentagem de potência instalada por agente produtor . . . . .	49
4.4	Percentagem de potência de carga por agente retalhista . . . . .	51
4.5	Diagramas de carga global(a) e individual(b), para o mercado diário . . . . .	52
4.6	Cenário I - Diagrama de produção para baixo perfil eólico . . . . .	54
4.7	Cenário II - Diagrama de produção para alto perfil eólico . . . . .	54
4.8	Cenário I - Diagrama de carga para baixo perfil eólico . . . . .	55
4.9	Cenário II - Diagrama de carga para alto perfil eólico . . . . .	55

---

4.10	Impacto da geração eólica no preço <i>system marginal price</i> (SMP) de mercado . . . . .	56
4.11	Impacto da geração eólica na produção média diária . . . . .	57
4.12	Impacto da geração eólica na procura média diária . . . . .	57
4.13	Diagramas de produção para os cenários III e IV . . . . .	60
4.14	Impacto da geração eólica no preço ( <i>locational marginal price</i> (LMP)) de mercado . . . . .	61
4.15	Diagramas de carga para os cenários III e IV . . . . .	62
4.16	Impactos da geração eólica na produção e procura (cenários III e IV) .	63
A.1	Diagrama de Produção (Eólica Baixa)- Variação entre Potência Instalada e Produzida . . . . .	76
A.2	Diagrama de Produção (Eólica Alta)- Variação entre Potência Instalada e Produzida . . . . .	77
A.3	Impacto da Geração Eólica no Diagrama de Produção . . . . .	78
B.1	Diagrama de Produção (Cenário III)- Variação entre Potência Instalada e Produzida . . . . .	82
B.2	Diagrama de Produção (Cenário IV)- Variação entre Potência Instalada e Produzida . . . . .	83
B.3	Impacto da Geração Eólica no Diagrama de Produção (Cenário III e Cenário IV) . . . . .	84
C.1	Diagrama de Carga (Eólica Baixa)- Variação entre Potência Procurada e Adquirida . . . . .	87
C.2	Diagrama de Carga (Eólica Alta)- Variação entre Potência Procurada e Adquirida . . . . .	88
C.3	Impacto da Geração Eólica no Diagrama de Carga . . . . .	89
D.1	Diagrama de Carga (Cenário III)- Variação entre Potência Procurada e Adquirida . . . . .	95
D.2	Diagrama de Carga (Cenário IV)- Variação entre Potência Procurada e Adquirida . . . . .	96
D.3	Impacto da Geração Eólica no Diagrama de Carga (Cenário III e Cenário IV) . . . . .	97

## LISTA DE TABELAS

4.1	Características gerais dos agentes produtores . . . . .	47
4.2	Perfis de produção do agente <i>GenCo_WindPower</i> . . . . .	49
4.3	Impacto da geração eólica no preço SMP de mercado . . . . .	56
4.4	Cenários III e IV - Características gerais dos agentes produtores . . . . .	59
4.5	Impacto da geração eólica no preço LMP de mercado . . . . .	61
B.1	<i>Generators</i> - Compromisso de Geração e Preço de Licitação para Cenário III . . . . .	80
B.2	<i>Generators</i> - Compromisso de Geração e Preço de Licitação para Cenário IV . . . . .	81
C.1	<i>Retailers</i> - Preço e Procura para o mercado diário . . . . .	86
D.1	<i>Retailers</i> - Procura Fixa e Procura Máxima para o mercado diário . . . . .	92
D.2	<i>Retailers</i> - Procura sensível ao preço e procura total adquirida em mercado para Cenário III . . . . .	93
D.3	<i>Retailers</i> - Procura sensível ao preço e procura total adquirida em mercado para Cenário IV . . . . .	94



## GLOSSÁRIO

**AMES** *Agent-based Modeling of Electricity Systems.*

**CCGT** ciclo combinado a gás natural.

**CMG** custos marginais[€/MWh].

**CT** custos totais[€].

**DC-OPF** *DC-Optimal Power Flow.*

**EDP** Energia de Portugal.

**EMCAS** *Electricity Market Complex Adaptive System.*

**ERSE** Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos.

**ISO** *Independent System Operator.*

**JADE** *Java Agent Development Framework.*

**LCOE** custo normalizado de energia.

**LMP** *locational marginal price.*

**MANREM** Negociação Multi-agente e Gestão de Risco em Mercados de Energia Elétrica.

**MASCEM** *Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets.*

**MEE** mercado de energia elétrica.

**MIBEL** Mercado Ibérico de Eletricidade.

**NEMSIM** *National Electricity Market Simulation System.*

**O&M** operação e manutenção.

**OAA** *Open Agent Architecture.*

**OM** operador de mercado.

**OMIE** Operador do Mercado Ibérico de Energia (Pólo Espanhol), S.A..

**OS** operador de sistema.

**REN** Rede Elétrica Nacional, S.A..

**REPAST** *Recursive Porous Agent Simulation Toolkit.*

**SEN** Sistema Elétrico Nacional.

**SEPIA** *Simulator for the Electric Power Industry Agents.*

**SIMEEL** Simulador de Mercados de Energia Elétrica.

**SMA** sistemas multi-agente.

**SMP** *system marginal price.*

**TNS** *Total Net Surplus.*

# INTRODUÇÃO

O presente capítulo efetua o enquadramento da dissertação, abordando os mercados de energia elétrica e os sistemas multi-agente. Ao longo do capítulo são também apresentados os objetivos propostos, as contribuições da dissertação e a sua estrutura global.

## 1.1 Enquadramento e Motivações

Desde o final do século XIX, um marco histórico associado ao início da produção, transporte e distribuição de energia elétrica, o setor tem observado constantes alterações e reestruturações. Inicialmente formado por redes elétricas de baixa potência e reduzido alcance geográfico, viu o seu crescimento ser impulsionado pelo aumento das potências de carga aliadas ao crescente desenvolvimento tecnológico [1].

Este desenvolvimento crescente conduziu à interligação das diversas redes existentes, originando redes elétricas de elevada potência e alcance, com maior segurança e fiabilidade. No caso particular do setor elétrico nacional, agora liberalizado, era atribuído a entidades estatais, gerido verticalmente e sem competitividade, traduzindo-se numa menor eficiência e maiores custos para os consumidores.

Segundo recomendações da Diretiva 2003/54/CE [2] do Parlamento Europeu, revista pela Diretiva 2012/27/UE [3], o Governo Português estabeleceu objetivos para o setor da energia elétrica, como a preocupação ambiental, a promoção da competitividade e a diversificação das fontes de energia primária. A reestruturação implementada e a criação do mercado de energia elétrica originou uma divisão do setor, que pode ser resumida em quatro grupos, nomeadamente, geração, transporte, distribuição e comercialização de energia.

A liberalização traduziu-se num aumento de empresas participantes nos setores de geração e/ou comercialização. Por sua vez, a exploração dos setores de transporte e distribuição continua a ser atribuída a entidades fixas, mais concretamente à Rede Elétrica Nacional, S.A. (REN) e à EDP Distribuição, geridas por um operador de sistema (denominado *Independent System Operator* (ISO) na literatura internacional), responsável por assegurar o bom funcionamento e garantir a segurança.

A reestruturação do setor elétrico apresenta vantagens para os participantes do mercado, que podem optar pela compra e venda de energia a preços conhecidos e transparentes, concretamente em mercado bolsista ou através do modelo de contratação bilateral, cujo funcionamento se baseia na celebração de um contrato, sendo possível negociar livremente os preços, volumes e cláusulas adicionais.

Com o desenvolvimento dos mercados liberalizados de energia, a complexidade do sistema aumentou consideravelmente. De forma a possibilitar a previsão de preços e apoiar a decisão dos agentes participantes, foram desenvolvidos simuladores de mercado baseados em sistemas multi-agente (SMA). A necessidade de um *software* com capacidade para simular o comportamento “real” das entidades participantes motivou a utilização de SMA, onde os agentes computacionais podem ser autónomos e possuírem capacidades de decisão e aprendizagem, em função do ambiente no qual se encontram inseridos. Partindo do facto que entidades distintas têm objetivos diferentes, a opção por SMA revela-se coerente, dado que os agentes computacionais possuem objetivos próprios e individuais, fazendo valer as suas capacidades de comunicação e interação [4].

## 1.2 Principais Objetivos

Os principais objetivos da dissertação são os seguintes:

- Estudar o simulador multi-agente MANREM, que permite aos participantes do mercado negociarem contratos bilaterais [5], [6], gerirem o risco através de transações em mercados a prazo [7], aliarem-se em coligações para poderem usufruir de melhores tarifas [8] e gerirem a participação ativa dos consumidores [9], [10];
- Estudar e adotar um algoritmo de preço marginal único, desenvolvido pela equipa do projeto MANREM;
- Estudar e adotar um algoritmo de preço marginal local, disponibilizado “online” como parte integrante do sistema AMES [11];
- Extender o simulador MANREM com um módulo para simular o mercado diário e intradiário; Implementar os algoritmos de preço marginal único e preço marginal local;
- Extender o simulador MANREM com uma interface genérica para os mercados em bolsa (diário e intradiário) e de contratação bilateral;
- Estudar detalhadamente um caso prático relativo à comercialização de níveis elevados de energia renovável no mercado em bolsa, mais especificamente, ao impacto de uma elevada penetração de energia eólica sobre os preços do mercado diário [12].

### 1.3 Contribuições

A presente dissertação, no âmbito da conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, foi desenvolvida com o apoio do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, no sentido de melhorar o simulador multi-agente MANREM com a capacidade de simulação e previsão de mercados de energia elétrica em bolsa, e contribuir para o estudo do impacto proveniente da licitação de um nível elevado de energia de produção em regime especial sobre os preços de mercado<sup>1</sup>.

O trabalho desenvolvido apresenta várias contribuições, entre as quais se destacam:

- Implementação computacional de dois algoritmos: um de preço marginal único e outro de preço marginal local;
- Desenvolvimento de uma interface genérica, que integra graficamente os mercados em bolsa e de contratação bilateral;
- Desenvolvimento do Simulador de Mercados de Energia Elétrica (SIMEEL), a partir do simulador MANREM, permitindo analisar o mercado em bolsa (ou *spot*) de energia elétrica, nomeadamente simular o funcionamento do mercado diário de acordo com os algoritmos de preço marginal único e preço marginal local, e possibilitando ainda estudar o mercado intradiário de energia elétrica, sem limite do número de participantes;
- Estudo das características singulares da geração eólica, motivado pelo significativo crescimento em resultado dos incentivos governamentais que valorizam objetivos como o cumprimento de metas relativas à geração de energia renovável, diversificação de tecnologias e contenção de custos. É, atualmente, um regime de produção que se encontra sob condições especiais de participação e cuja tecnologia apresenta custos marginais praticamente nulos [13]. Deste modo, o estudo permitiu replicar, em computador, o potencial impacto de um alto nível de produção eólica sobre os preços de mercado em bolsa, permitindo também estudar os efeitos sobre os compromissos de produção e sobre as receitas dos participantes de mercado. Salienta-se que o estudo deu origem a um artigo, publicado pela IEEE, num evento sobre mercados de energia e sistemas multi-agente [12].

---

<sup>1</sup>Trabalho realizado no âmbito do projeto MAN-REM (FCOMP-01-0124-FEDER-020397), financiado pelo FEDER através do programa COMPETE- Programa Operacional Temático Factores de Competitividade, e pela FCT- Fundação para a Ciência e Tecnologia.

## 1.4 Estrutura de Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No presente capítulo, é realizado o enquadramento do tema, sendo apresentados os objetivos, as contribuições da dissertação e a estrutura global de cada um dos restantes capítulos.

No segundo capítulo, denominado “*Mercados de Energia Elétrica e Sistemas Multi-Agente*”, são inicialmente abordados os conceitos transversais aos mercados económicos, descrevendo-se posteriormente o MIBEL, nomeadamente o seu enquadramento histórico e os eventos que impulsionaram o seu desenvolvimento. O capítulo introduz também os conceitos de agente computacional e sistema multi-agente, sendo descritas as suas principais características. Por fim, descrevem-se várias aplicações computacionais para simular mercados de energia, baseadas na tecnologia multi-agente.

O terceiro capítulo apresenta detalhadamente a aplicação computacional desenvolvida, incluindo as suas principais funcionalidades, a interface gráfica e ainda os dois algoritmos utilizados para simular o mercado em bolsa.

O capítulo quatro apresenta o caso de estudo, desenvolvido com o intuito de analisar e replicar em computador os efeitos produzidos pela licitação de níveis elevados de energia eólica no mercado diário. O estudo foi realizado com base nos algoritmos de preço marginal único e de preço marginal local.

No quinto e último capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas após condução do presente estudo e as propostas de desenvolvimento futuro, no âmbito dos mercados liberalizados e do simulador desenvolvido.



## MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA E SISTEMAS MULTI-AGENTE

O presente capítulo descreve o funcionamento geral dos mercados económicos e as especificidades relativas aos mercados de energia elétrica, apresentando também de forma detalhada, os conceitos de agente computacional e sistema multi-agente. Relativamente à temática dos mercados de energia elétrica, o capítulo descreve os diferentes modelos de mercado existentes abordando, de forma genérica, os algoritmos utilizados para o cálculo dos preços de mercado, e também o caso particular do Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL). Por fim, o capítulo apresenta o conceito de agente computacional e contextualiza a situação atual na área da simulação dos mercados de energia.

## 2.1 Fundamentos de Mercados Económicos

De forma a possibilitar uma melhor compreensão relativamente ao mercado de energia elétrica (MEE), revela-se oportuno abordar, numa primeira instância, os conceitos gerais à economia de mercado, de forma a abordar, posteriormente, as características que individualizam os mercados de energia elétrica. Ao longo desta secção são abordados os conceitos de curva de procura, curva de oferta, ponto de equilíbrio, custos totais[€] (CT) e custos marginais[€/MWh] (CMG), definindo-se também os métodos para a sua obtenção.

### 2.1.1 Modelo de Oferta e Procura

O modelo da oferta e procura, ou recorrendo à literatura inglesa, *model of supply and demand*, reúne conceitos fundamentais e transversais à economia de mercados. De uma forma geral, a oferta e a procura relacionam a variação da quantidade de um produto em função do aumento do preço praticado, ou seja, a oferta determina a quantidade de um determinado bem que os produtores estão dispostos a vender [1], [14]. A relação entre a quantidade fornecida e o preço de venda denomina-se por curva da oferta e o seu declive é, normalmente, positivo.

A procura determina a quantidade de um determinado bem que os compradores estão dispostos a adquirir, sendo a relação entre a quantidade procurada e o preço de compra denominada de curva da procura (o seu declive é, por norma, negativo). O modelo de oferta e procura visa definir o ponto no qual as curvas se interseçam, determinando assim a quantidade e o preço de equilíbrio a ser praticado por um dado mercado, num intervalo temporal definido [14], como salientado na seguinte frase [15]:

“O objetivo do modelo (...) é determinar os preços e quantidades que serão transacionadas num determinado mercado.”

Para simplificar e facilitar a compreensão, considere-se o exemplo de um mercado grossista de energia, no qual existem dois tipos de agentes: produtores e consumidores. Os agentes produtores pretendem vender a energia ao preço mais alto possível de forma a maximizar a sua margem de lucro. No sentido oposto, os agentes consumidores possuem o objetivo de adquirir energia pelo preço mais baixo possível, de forma a reduzir os custos e aumentar o seu bem estar.

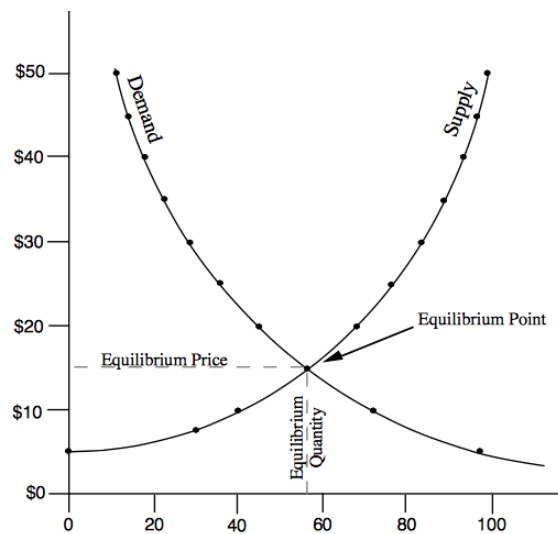


Figura 2.1: Ponto de equilíbrio entre oferta e procura [14]

Os agentes produtores são representados através de uma curva de oferta (tendencialmente crescente com o aumento dos preços) e os agentes consumidores por uma curva de procura (normalmente decrescente, para o mesmo aumento dos preços). Desta forma, o objetivo do modelo passa por determinar a quantidade de energia elétrica transacionada, e o respetivo preço, para um determinado intervalo temporal (normalmente uma hora). Para a obtenção do ponto de equilíbrio, como ilustrado na figura 2.1, é necessário compreender, primeiramente, como surgem as propostas de compra e venda de energia por parte das entidades participantes.

### 2.1.2 Equilíbrio de Mercado

Tendo por base o exemplo anterior, referente ao mercado grossista de energia, uma pergunta importante consiste em: O que determina a quantidade e o preço ao qual os produtores desejam vender a energia produzida? Sendo a maximização do lucro o principal objetivo dos agentes e, ignorando outras variáveis que possam influenciar a decisão dos produtores, a análise centrar-se-á na quantidade transacionada e no seu preço. Supondo que um agente produtor determina o preço de venda sem influenciar a procura, como o seu objetivo visa a maximização do lucro, esse preço seria infinitamente alto. Esta situação seria insustentável pois, como a escolha do preço, por parte do agente produtor, influencia a procura, uma curva da oferta com preços superiores ao preço de reserva originaria uma procura nula por parte dos agentes compradores. Conclui-se que, à medida que o preço de venda diminui, a procura por essa quantidade aumentará [16].

Para a produção de energia, os agentes produtores possuem custos marginais, representando o preço a pagar para a produção de mais um lote e, por norma, uma empresa não deseja vender um bem com prejuízo. Em sentido oposto, encontra-se a curva da procura que, em situações genéricas e apenas analisando as variáveis quantidade e preço, à medida que o preço da energia diminui, a quantidade procurada tem tendência a aumentar.

### 2.1.3 Elasticidade da Procura ao Preço

Como é possível observar em [15], a resposta da procura a alterações de preço por parte da oferta (agente produtor) não obedece a uma regra, isto é, normalmente o aumento do preço leva a uma redução da procura dirigida ao bem que está a ser transacionado. No entanto, essa redução pode ser residual, ou bastante significativa, pelo que se saliente o seguinte [15]:

“... para decidir sobre os preços ótimos para cada mercado, é necessário conhecer a sensibilidade do mercado às variações do preço ...”

Tendo em consideração a necessidade de se saber qual o valor da elasticidade da procura à variação de preço, é necessário determinar qual a variação da procura face a um aumento percentual do preço, como se indica na seguinte frase [15]:

“... a razão entre a variação proporcional da quantidade e a variação proporcional do preço que deu origem a essa variação da quantidade ...”

Como será abordado ao longo da presente dissertação, os mercados de energia elétrica possuem uma curva da procura específica pois, ao contrário de muitos outros bens, a eletricidade é um bem indispensável ao funcionamento da sociedade e, como tal, a procura por energia elétrica é composta por uma procura fixa, que necessita de ser satisfeita, e uma procura sensível ao preço [17]. No entanto, a sensibilidade ao preço não é transversal pois [15]:

“... a elasticidade da procura de um mesmo produto pode ainda diferir significativamente de cliente para cliente ...”

Sucintamente, e sabendo que em situações reais não é possível determinar com exatidão a sensibilidade ao preço, a sua estimativa revela-se um método de extrema importância para a tomada de decisões de uma empresa podendo ser realizada, por exemplo, com base em dados históricos [15].

## 2.2 Mercados de Energia Elétrica (MEEs)

A liberalização e as mudanças implementadas ao longo dos últimos anos potenciaram o desenvolvimento e crescimento dos MEEs, visto o sector elétrico ser responsável por um bem de grande procura, tendo atraído para si novas empresas, nas áreas de produção e comercialização de energia.

O aumento do número de empresas, concorrentes entre si, intensificou a competitividade, impulsionando o desenvolvimento tecnológico, de forma a reduzir os custos marginais e otimizar as margens de lucro por quantidade vendida, contrariando os efeitos negativos inerentes à redução de preços. Em particular, as alterações verificadas no Sistema Elétrico Nacional (SEN) permitem a comercialização de energia no mercado bolsista bem como efetuar transações com recurso ao modelo de contratação bilateral.

O mercado de energia elétrica, quando comparado com o conceito genérico de mercado, surge como um caso particular, devido às suas características específicas. Desta forma, a existência de limitações técnicas necessita de ser considerada, visto limitarem a quantidade de energia transacionada entre os nós da rede de transporte, influenciando negativamente a otimização económica. A dificuldade de armazenamento da energia elétrica obriga a que a sua produção ocorra em tempo real, sendo ainda necessário considerar as perdas energéticas associadas à resistência dos materiais durante o processo de transporte, bem como outros fatores externos, tendo como exemplo as condições climatéricas.

Todas estas particularidades do setor elétrico atribuem aos MEEs características ímpares e complexas, sendo de extrema dificuldade a realização de previsões a curto-prazo, fortalecendo assim a inerente volatilidade de preços.

### 2.2.1 Reestruturação do Setor Elétrico

Os últimos anos registaram uma grande reestruturação do setor elétrico. Contudo, a evolução tem sido operada desde o século XIX, marco histórico para o início de atividades como a produção, o transporte e a distribuição de energia elétrica.

Ao contrário do sistema elétrico atual, regista-se o seguinte sobre os primeiros sistemas elétricos [1]:

“...na sua fase inicial (...) era formado por redes elétricas de pequena potência e extensão geográfica devido, não apenas ao valor diminuto das potências de carga envolvidas, mas também às tecnologias então disponíveis ...”

Com o aumento da potência de carga, entenda-se aumento da procura, aliado ao desenvolvimento tecnológico, o alcance geográfico das redes registou aumentos significativos, verificando-se o mesmo ao nível das potências envolvidas [1]. A evolução registada impulsionou o investimento na construção de redes de maior extensão e com capacidade superior de transporte de energia elétrica, dando origem à integração de diversas redes individuais, que originaram redes com dimensão geográfica e capacidade suficientes para a distribuição de energia elétrica a nível nacional.

Em Portugal, o ano de 1976 representa um marco importante para o setor, dado que, até à data, o SEN assentava a sua organização em “concessões atribuídas a entidades privadas” [1], que exploravam o mercado sem qualquer competição, traduzindo-se em preços desajustados para o consumidor. Embora existissem diversas concessões a nível nacional, cada empresa concessionária possuía um número de clientes fixos.

A partir de 1976, o SEN foi nacionalizado e a sua exploração entregue à Energia de Portugal (EDP), que apresentava uma estrutura verticalmente integrada, ou seja, uma empresa única, que explorava a produção, o transporte, a distribuição e a comercialização de energia. Apresentou-se, desta forma, como uma empresa monopolista, o que se traduziu num bloqueio à inovação e ao desenvolvimento, dando origem a preços de mercado elevados, sacrificando o bem estar do consumidor.

A reestruturação do setor, ocorrida durante os últimos anos, deu origem ao término das estruturas de mercado vertical, como ilustrado na figura 2.2, originando a criação de diversas empresas nas áreas de produção e comercialização, impulsionando a competitividade e a respetiva adequação dos preços praticados. Relativamente às áreas de transporte e distribuição, devido ao facto de implicarem custos in comportáveis e pouco atrativos à entrada de empresas no mercado, manteve-se

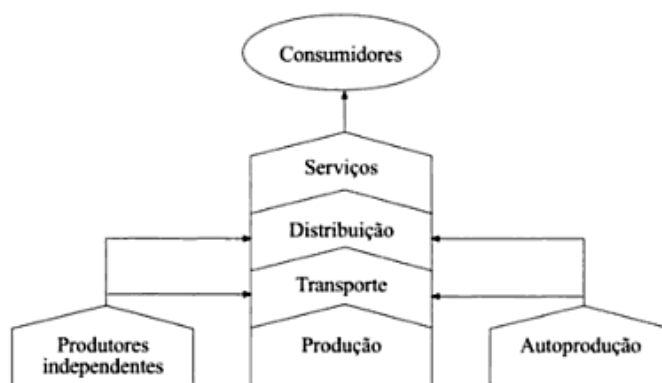


Figura 2.2: Mercado elétrico com estrutura vertical [1]

o formato monopolista anteriormente referido. Posto isto, surgiu ainda a necessidade de criação de mecanismos de coordenação e regulação independentes.

As mudanças registadas com a reestruturação originam vantagens para os consumidores, como por exemplo, o seu acesso ao mercado em bolsa, bem como o direito à escolha das empresas fornecedoras, através do modelo de contratação bilateral.

### 2.2.2 Mercado em Bolsa ou *Spot*

O modelo de mercado em bolsa representa uma das formas de relacionamento entre agentes produtores e agentes consumidores, baseado no modelo de mercado apresentado na secção 2.1.1. Realça-se o seguinte [1]:

“...estes mercados integram ou administram mecanismos a curto prazo nos quais se pretende equilibrar a produção e o consumo através de propostas comunicadas pelas entidades produtoras, por um lado, e pelos comercializadores e consumidores elegíveis, por outro.”

O mercado bolsista em Portugal, como em qualquer outro mercado, possibilita aos agentes participantes (produtores, consumidores, comercializadores, etc.) a compra e venda de energia a um preço conhecido e transparente, definido para o dia seguinte ao da negociação. Após encerrada a sessão do mercado diário, os agentes participantes podem voltar a transaccionar energia no mercado intradiário, com diferentes períodos estabelecidos para o efeito e através do agendamento de transações horas antes do tempo real. Existem diferentes sessões, como será abordado ao longo do presente capítulo, e nas quais serão determinados os preços

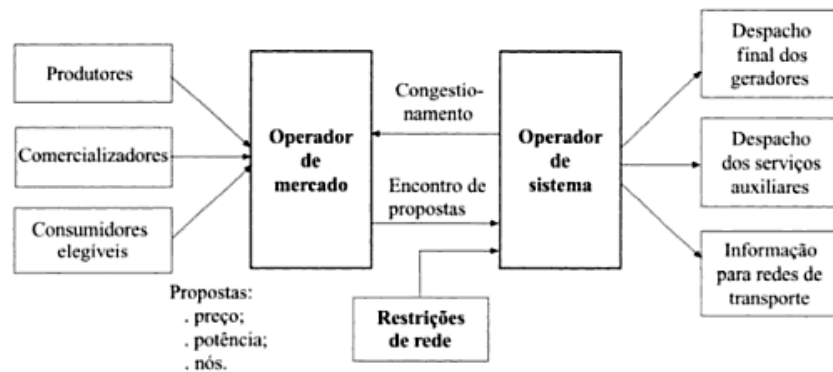


Figura 2.3: Modelo de exploração do setor elétrico em mercado *spot* [1]

e volumes com recurso à interseção entre as curvas de oferta e procura [18].

A curva da oferta é, como observado anteriormente, definida pela quantidade de energia que os agentes produtores desejam vender em função da variação do preço. Por outro lado, a curva da procura é definida pela quantidade de energia elétrica que os agentes consumidores desejam comprar em função da mesma variação do preço. Como a energia elétrica é um bem fundamental, a procura dirigida ao bem não é sempre sensível ao preço, pois parte da energia elétrica necessária é definida como procura fixa, ou seja, não varia com o aumento do preço. Os agentes produtores e consumidores estabelecem as suas curvas de oferta e procura, respetivamente, comunicando as mesmas ao operador de mercado (OM), responsável por organizar as propostas recebidas e estabelecer os preços e as quantidades de energia para cada um dos intervalos temporais.

Dada a já referida dificuldade de armazenamento da energia, a produção ocorre em tempo real, originando uma volatilidade de valores. As dificuldades de previsão de cargas obrigam à discretização do dia em intervalos temporais mais reduzidos de forma a minimizar o erro. Deste modo, efetua-se frequentemente a discretização das 24 horas diárias em 24 ou 48 intervalos de uma hora ou trinta minutos, respetivamente.

Os agentes participantes no mercado comunicam as suas propostas para cada um dos intervalos diários, sendo estabelecido o preço e a quantidade por intervalo temporal, por parte do OM e mediante a aprovação do operador de sistema (OS), entidade responsável por verificar e assegurar a viabilidade dos valores envolvidos em função do risco de congestionamento e limitações físicas da rede. A organização do mercado encontra-se ilustrada na figura 2.3. As propostas enviadas pelos

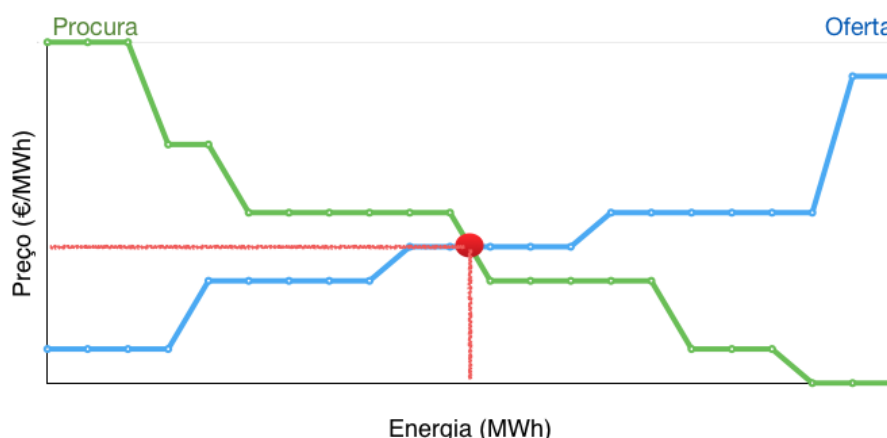


Figura 2.4: Modelo de oferta e procura para o mercado diário

agentes podem também conter o preço mínimo e o preço máximo a que estes se dispõem a comprar/vender energia, bem como a potência disponível/requisitada.

### 2.2.2.1 Mercado Diário

No MIBEL, a gestão do mercado diário é da responsabilidade do Operador do Mercado Ibérico de Energia (Pólo Espanhol), S.A. (OMIE), sendo este um mercado no qual se transacciona eletricidade para o dia seguinte ao da licitação, estando o seu funcionamento baseado na hora legal espanhola. À imagem do referido na secção 2.1, no mercado diário os agentes participantes enviam as ofertas de compra e venda de energia, nas quais está incluído o dia e a hora a que se reporta, bem como o preço e o volume de energia a ser transaccionado.

As ofertas são ordenadas de forma a ser possível estabelecer os preços e volumes a serem transaccionados para cada uma das 24 horas do dia. A ordenação é realizada de forma crescente para as ofertas de venda e decrescente para as ofertas de compra (à semelhança do funcionamento tradicional de mercados, como descrito na secção 2.1.1). O preço de mercado é então definido através da intersecção entre as duas retas (modelo de oferta e procura) como ilustrado na figura 2.4 [18], [19].

Ao contrário do que ocorre em outros mercados, no MIBEL a organização do mercado diário reside no que se designa por modelo de preço marginal único (ou SMP), implicando que o preço de mercado seja igual para todos os participantes — o preço a pagar pelos compradores é igual ao preço a receber pelos vendedores.

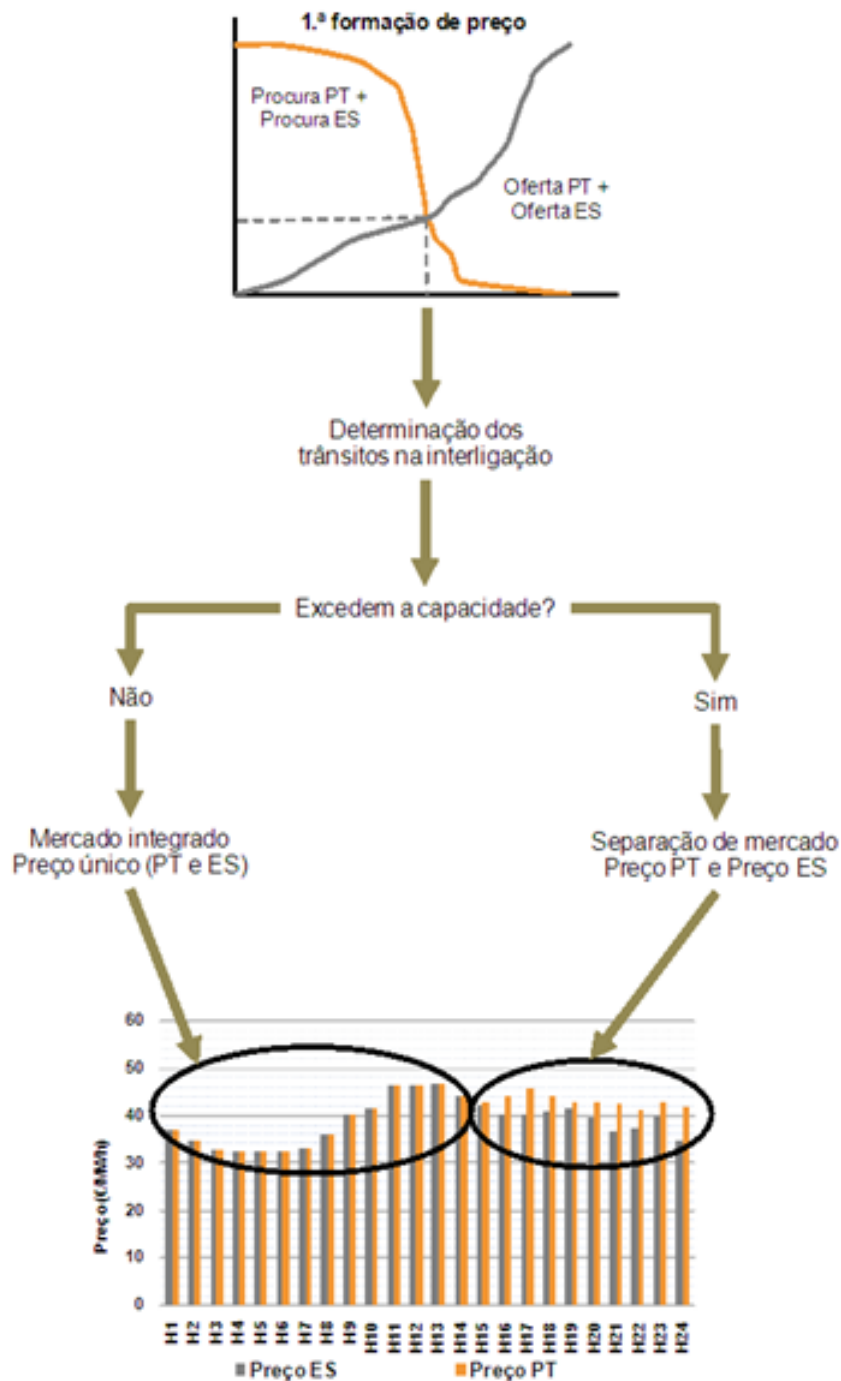


Figura 2.5: Processo de formação de preço no mercado diário [19]

Realça-se que a problemática do risco de congestionamento da rede de transporte necessita também de ser contabilizada. Com o algoritmo de preço marginal local (LMP), o preço de mercado varia ao longo da rede de energia elétrica de acordo com o custo marginal dos agentes produtores, a localização na rede e em função dos risco de congestionamento no local [20]. Por sua vez, o modelo de

preço marginal único não possibilita a previsão do risco de congestionamento, sendo normalmente utilizado um mecanismo de separação de preços (ou *market splitting*) [21].

Como o MIBEL envolve Portugal e Espanha, é necessário prever a incapacidade da interligação entre os países comportar os fluxos de energia determinados em mercado, com recurso ao modelo de oferta e procura. No caso de existência de previsão de ocorrência de congestionamento na interligação entre países, as regras atuais determinam o recurso ao mecanismo de separação de preços, o que consiste na separação das duas áreas de mercado, e que se definam preços específicos para cada um dos países. O processo de definição do preço de mercado e posterior separação de preços encontra-se ilustrado na figura 2.5.

De forma a garantir o bom funcionamento do mercado e minimizar o número de situações nas quais é registada a separação de preços, a supervisão atua no mercado de forma a assegurar que a separação de preços possui o menor número de repetições possíveis, e que não ocorre devido a comportamentos que visem alterar a concorrência equitativa existente entre os diversos agentes [19].

A Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) disponibiliza um relatório dinâmico [22] no qual é possível consultar informação em relação aos preços e volumes de mercado, bem como informação relativa aos períodos no qual se registou separação de preços entre os dois países. Com base nessa informação, e

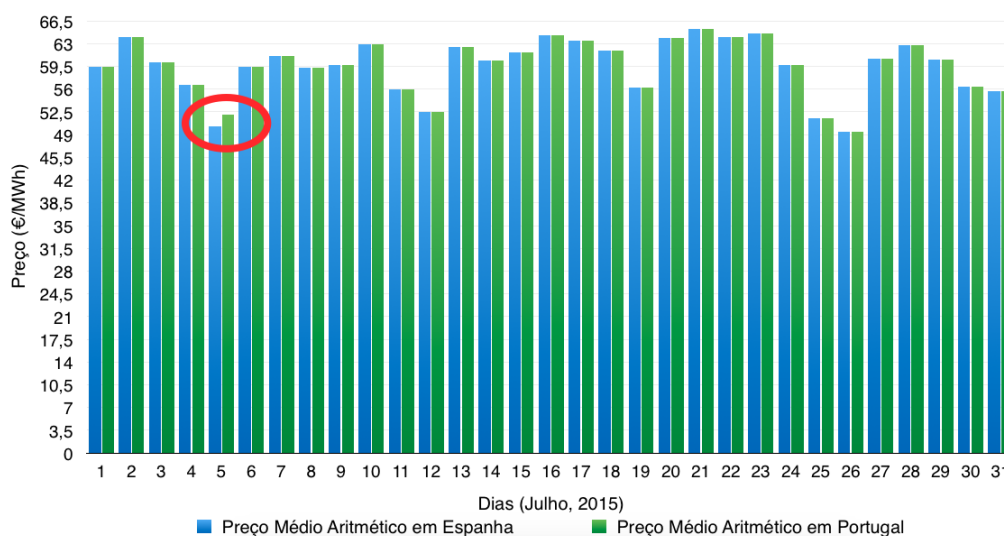


Figura 2.6: OMIE - *Market splitting* no mês de Julho, 2015 [22]

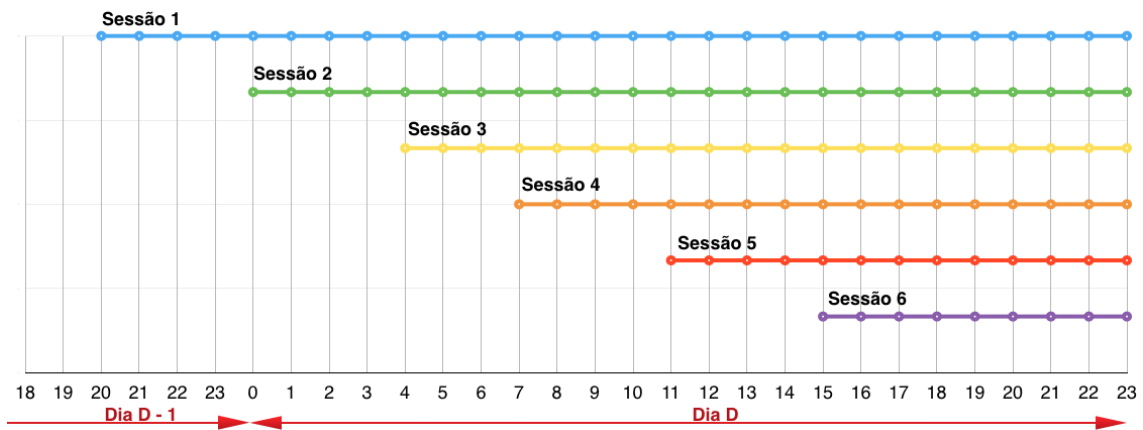


Figura 2.7: Mercado intradiário - Distribuição das seis sessões diárias

tendo em consideração o preço médio aritmético da energia em Portugal e Espanha ao longo do mês de Julho do ano 2015, é possível observar a existência do mecanismo de *market splitting* no dia 05 do referido mês (ver figura 2.6).

### 2.2.2.2 Mercado Intradiário

Após ser realizada a sessão de mercado diário, o MIBEL possibilita aos agentes de mercado a compra e venda de energia elétrica através da licitação em seis diferentes sessões, permitindo que estes reajustem os seus compromissos até quatro horas antes da hora real [18].

Esta licitação, à semelhança do que ocorre no mercado diário, é efetuada por agentes registados e que cumpram as premissas do mercado intradiário, sendo cada oferta composta pelo dia e a hora a que se reporta, a sessão a que se destina, o preço e a quantidade de energia associada.

Segundo informação presente no site do OMIE, realça-se o seguinte [18]:

“Este mecanismo marginalista de mercado por sessões faz com que o mercado intradiário no MIBEL seja o mais líquido da UE, permitindo que todos os agentes (especialmente os pequenos), ajustem de uma forma fácil e em igualdade de condições com qualquer outro operador, a sua posição dentro do mesmo dia da entrega física. O nosso mercado intradiário oferece preços semelhantes aos que resultam no mercado diário e isto faz com que seja também o mais competitivo a nível europeu.”

Este mercado é composto por seis sessões diferentes que possibilitam ajustes face ao definido em mercado diário, funcionando segundo os seguintes intervalos temporais [21]:

- A primeira sessão forma o preço para as 4 últimas horas do dia de negociação e para as 24 horas do dia seguinte (total de 28h, das 20h do dia D-1 às 24h do dia D);
- A segunda sessão forma o preço para as 24 horas do dia seguinte (das 00h às 24h do dia D);
- A terceira sessão forma o preço para as 20 horas do dia seguinte (das 05h às 24h do dia D);
- A quarta sessão forma o preço para as 17 horas do dia seguinte (das 08h às 24h do dia D);
- A quinta sessão forma o preço para as 13 horas do dia seguinte (das 12h às 24h do dia D);
- A sexta sessão forma o preço para as 9 horas do dia seguinte (das 16h às 24h do dia D).

Para um agente se encontrar habilitado a licitar ofertas de venda no mercado intradiário, a OMIE define algumas premissas a serem cumpridas, tais como o facto desse agente apenas estar habilitado a licitar as ofertas de venda no mercado intradiário se estiver habilitado a licitar no mercado diário, se tiver participado na sessão diária correspondente, ou celebrado um contrato bilateral [18].

Relativamente às ofertas de compra, encontram-se habilitados todos os agentes que possam efetuar ofertas de venda de energia elétrica no mercado diário e também os agentes que se encontram habilitados a apresentar ofertas de compra no mercado diário e que tenham participado no mercado diário correspondente sobre o qual incide a sessão de mercado intradiário ou, à semelhança do ponto anterior, tenham celebrado um contrato bilateral físico [18].

Como é possível observar na figura 2.7, o mercado intradiário cobre todas as horas do dia e realiza-se para todos os dias do ano, sendo a hora de negociação determinada pela hora legal espanhola.

### 2.2.3 Contratação Bilateral

O modelo de contratação bilateral pode ser definido como o relacionamento entre dois agentes, um produtor e um consumidor, através da celebração de um contrato, no qual é possível negociar livremente o preço, bem como os termos e condições do contrato [23]. De uma forma abrangente, podem ser definidos dois tipos diferentes de contratos, nomeadamente contratos bilaterais físicos e contratos de índole financeira, apresentando cada um deles características específicas.

Os contratos bilaterais físicos, habitualmente celebrados para um espaço temporal a longo prazo, estabelecem a quantidade de energia elétrica que será transacionada entre as entidades, negociando-se também o preço e as restantes condições. As quantidades a serem transacionadas necessitam de considerar os limites físicos do sistema. Por norma, este tipo de contratos garante estabilidade de preços, sendo o preço fixado para períodos de tempo extensos (por exemplo, superior a seis meses). Desta forma, é possível evitar a volatilidade de preços de mercado mas, em contrapartida, um aumento do número de contratos bilaterais físicos celebrados pode não ser positivo, visto poder reduzir a transparência de preços [23].

Os contratos de índole financeira fornecem segurança relativamente à variação de preços, pois contrariam as variações da oferta/procura. De forma a contrariar o risco inerente ao mercado, vários modelos de contratos podem ser celebrados entre um agente produtor e um agente consumidor como, por exemplo, contratos por diferenças, contratos futuros e contratos com opções de compra ou venda de energia [23].

### 2.2.4 Modelo Misto

O modelo misto, tal como o nome sugere, surge como a combinação dos dois modelos anteriormente apresentados. Neste modelo, o recurso ao mercado bolsista de energia elétrica é um ato voluntário e coexiste com a celebração de contratos bilaterais, uma vez que as entidades envolvidas podem transacionar a energia diretamente entre produtor e consumidor (modelo de contratação bilateral) ou em mercado em bolsa.

A entidade responsável pelas transações de energia é o operador de mercado, sendo o operador de sistema responsável por assegurar a viabilidade técnica em conjunto com a viabilidade dos acordos celebrados pela contratação bilateral [24].

A energia elétrica transacionada com recurso à contratação bilateral garante preços adaptados e prolongados por períodos temporais extensos, sendo o preço base para a negociação obtido no mercado em bolsa (revela assim uma importância considerável para o modelo de contratação bilateral) [23].

## 2.3 Sistemas Multi-Agente e Plataformas Computacionais

Esta secção apresenta os traços gerais e as potencialidades dos sistemas multi-agente. São também apresentadas três plataformas computacionais (JADE, REPAST e OAA), utilizadas para a criação e desenvolvimento de sistemas multi-agente.

### 2.3.1 Sistemas Multi-Agente (SMA)

A liberalização e o conseqüente aumento de entidades participantes no mercado, com diferentes interesses individuais, deu origem a um setor competitivo com crescente imprevisibilidade comportamental por parte dos seus intervenientes. Com o referido aumento de competitividade, as entidades que participam no mercado têm a necessidade de alterar o seu comportamento e estratégias, motivando assim o desenvolvimento de soluções computacionais que as permitam modelar de forma coerente e apoiar a sua tomada de decisão.

Agregada a essa complexidade, o conhecimento encontra-se distribuído pelas diversas entidades participantes no mercado, resultando em agentes com informação e capacidade de resolução de problemas limitada, não existindo um controlo global, mas sim a necessidade de interação e eventualmente cooperação. Com base nestas particularidades, os agentes computacionais surgem como solução natural para modelar os MEEs, proporcionando às entidades participantes uma maior capacidade de solucionar problemas complexos.

De forma de representar as entidades reais que participam no mercado, os agentes não possuem um objetivo comum, mas sim objetivos individuais, originando diferentes comportamentos e incentivando a cooperação na resolução de conflitos. O facto de cada agente possuir características diferenciadas dá origem a percepções distintas de comportamentos de mercado, capacidades diferentes de aprendizagem e diferentes formas de atuar/decidir. Para ser possível a um SMA

modelar o mercado de energia elétrico, os agentes computacionais necessitam de comunicar, sendo então fundamental a sua organização por estruturas que visem a comunicação e interação, recorrendo a protocolos de interação social inspirados no comportamento humano, garantindo a negociação em prol de objetivos que satisfaçam os diversos participantes, à semelhança do ocorrido entre entidades reais [4]. Para assegurar a fiabilidade de resultados e o correto funcionamento, a coordenação desempenha um papel essencial, gerindo interações e dependências entre os diversos agentes do sistema [23], [24].

### 2.3.2 SMA - Plataformas Computacionais

Esta secção apresenta três plataformas baseadas em agentes, nomeadamente JADE, REPAST e OAA. Ao longo da secção será atribuído particular destaque à plataforma JADE, visto ter sido a plataforma utilizada no desenvolvimento do simulador “Negociação Multi-agente e Gestão de Risco em Mercados de Energia Elétrica (MANREM)”.

#### 2.3.2.1 JADE

O *Java Agent Development Framework* (JADE) é uma plataforma computacional implementada com recurso à linguagem JAVA. Esta plataforma multi-agente caracteriza-se como *open-source*, sendo disponibilizado o código fonte. A plataforma reúne características relevantes para o desenvolvimento de agentes computacionais, visto permitir a mobilidade de agentes, assegurando a possibilidade de execução em diferentes máquinas e sistemas operativos. A sua configuração é controlada com recurso a uma interface gráfica [25].

O JADE possibilita ainda o desenvolvimento de aplicações multi-agente respeitando as especificações da *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA). Para os sistemas possuírem interoperabilidade, necessitam de assegurar a capacidade de comunicação e troca de informações sem existência de conflitos. As especificações FIPA para a interoperabilidade determinam que [25]:

- O nome de um agente indica a sua localização;
- É possível um agente procurar outros agentes através do serviço que disponibiliza;
- Aspectos extra-agente e independentes das aplicações, como o transporte ou a codificação e interpretação de mensagens, têm de se encontrar descritos.

### 2.3.2.2 REPAST

O *Recursive Porous Agent Simulation Toolkit* (REPAST) é uma plataforma de modelação de agentes, amplamente utilizada, permitindo a realização de simulações com o intuito de estudar a evolução dos agentes e dos ambientes onde atuam. Desenvolvida na Universidade de Chicago pela *Social Science Research Computing*, trata-se de uma plataforma *open-source* que possui três versões diferentes, adaptadas às linguagens de programação JAVA, .NET e Python, sendo denominadas de: *Repast J*, *Repast.Net* e *Repast Py*, respetivamente [26], [27].

O REPAST coloca a ênfase no comportamento social dos agentes, tendo sido a plataforma selecionada para o desenvolvimento dos simuladores AMES (secção 2.4.1) e EMCAS (secção 2.4.2). Esta ferramenta é frequentemente utilizada para o desenvolvimento de sistemas no âmbito das ciências sociais.

### 2.3.2.3 OAA

A plataforma *Open Agent Architecture* (OAA) foi desenvolvida pelo Centro de Inteligência Artificial da *SRI International*, sendo uma ferramenta de investigação para o desenvolvimento de SMA. A linguagem de comunicação comum a todos os agentes, independentemente do sistema operativo ou linguagem de programação utilizada, é a *Interagent Communication Language* (ICL), sendo utilizada para troca de informação, execução de ações e consultas de dados.

Esta ferramenta possui uma estrutura com recurso a um agente “*facilitator*”, munido de estratégias de coordenação independentes do domínio da aplicação, que visa coordenar os diversos agentes. Apresenta a vantagem de suportar uma grande diversidade de agentes, pois estes podem ser concebidos por diferentes linguagens de programação e executados em diferentes sistemas operativos. Foi a plataforma escolhida para o desenvolvimento do simulador *Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets* (MASCEM) [28], apresentado na secção 2.4.3.

## 2.4 Simuladores Multi-Agente de Mercados de Energia

A presente secção apresenta os simuladores multi-agente AMES, EMCAS, MASCEM, NEMSIM e SEPIA, realçando as suas principais características e limitações.

### 2.4.1 AMES

O simulador *Agent-based Modeling of Electricity Systems* (AMES) foi desenvolvido pela Universidade do Estado de Iowa — EUA, no seguimento de uma proposta de reestruturação do mercado grossista de eletricidade, por parte da *US Federal Energy Regulatory Commission* (FERC), no ano de 2003 [11].

O AMES<sup>1</sup> é um *software open-source*, desenvolvido com recurso à plataforma REPAST e à linguagem de programação JAVA. O simulador possui uma arquitetura baseada em módulos e bibliotecas *open-source*, apresentando excelentes capacidades gráficas para apresentação de resultados, e permitindo a otimização de trânsito de fluxos. Os agentes possuem capacidades de aprendizagem, sendo de realçar o caso dos agentes produtores.

O seu desenvolvimento modular permite a adaptação do *software* em função das necessidades. A primeira versão foi desenvolvida em 2007, tendo sido atualizada desde então. O acesso fácil ao *software* bem como ao código fonte visa apoiar a investigação e a obtenção de soluções adaptadas às necessidades [11].

**Características Gerais.** O AMES oferece a capacidade de adaptação à zona geográfica para a qual é efetuado o estudo, simulando o comportamento de um "administrador central", operando em intervalos temporais pré-definidos e com capacidade de atuar no mercado diário. O LMP para cada intervalo temporal é determinado através da resolução do problema *DC-Optimal Power Flow* (DC-OPF) [11].

O simulador opera no mercado grossista de eletricidade, sendo necessário definir o tempo de simulação, de forma a ser possível realizar o estudo desde o dia 1 até ao último dia definido. Cada dia é definido por 24 intervalos de uma hora, possibilitando a redução dos erros de previsão motivados pela inerente volatilidade de preços característica do mercado.

A arquitetura adotada para o sistema multi-agente contempla agentes cognitivos tais como produtores (GenCos), retalhistas/comercializadores (LSEs) e o operador de sistema. De forma a proporcionar uma melhor compreensão da estrutura associada a cada agente, serão analisadas as suas principais características.

---

<sup>1</sup>Disponibilizado “on-line” em <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/AMESMarketHome.htm>

**Configuração Estrutural dos Produtores (*Generation Companies*).** Como descrito em [29], o simulador AMES assume entidades produtoras apenas com capacidade de venda, isto é, agentes do tipo produtor apenas podem vender a energia produzida a agentes do tipo retalhistas/comercializadores. É possível determinar a tecnologia utilizada, parametrizar as capacidades de aprendizagem, e estabelecer o valor monetário associado a cada agente. Estes agentes têm como principal objetivo maximizar o lucro diário. Até às 14 horas de um dia  $D$ , o agente produtor define a sua oferta para os 24 intervalos do dia  $D+1$ , enviando para o operador de sistema as propostas de venda.

Cada produtor reporta o seu custo marginal ao operador de sistema. De forma a reduzir o risco e incrementar o lucro, um produtor pode reportar uma curva de custos marginais superior à curva real. Por sua vez, reportar uma capacidade máxima inferior à capacidade máxima real é também uma forma de subir os preços de mercado e respetiva margem de lucro. O facto destes agentes possuírem capacidades de aprendizagem facilita a otimização das propostas [30].

O montante monetário é estipulado pelo utilizador no início da simulação. O programa não contempla entradas ou saídas de agentes durante a realização do estudo e, devido a isso, agentes com montantes monetários negativos não são penalizados. Este simulador não permite variar a estratégia de licitação, focando-se principalmente na aprendizagem dos agentes produtores [11], [30].

**Configuração Estrutural dos Consumidores (*Load-Serving Entities*).** O objetivo dos agente do tipo LSEs consiste em assegurar a potência de carga necessária para satisfazer a procura. Cada LSE reporta a sua proposta de compra de energia ao operador de sistema para cada um dos 24 intervalos do dia seguinte. Estes agentes definem-se pela ausência de capacidades de aprendizagem, sendo os dados estáticos e introduzidos pelo utilizador no início de cada simulação.

**Configuração Estrutural do Operador de Sistema (OS).** O agente OS administra e gere o mercado grossista de energia, possuindo como principal objetivo maximizar o ganho global do sistema, definido no simulador AMES como *Total Net Surplus* (TNS).

Após receber as propostas por parte dos agentes GenCos e LSEs, durante a manhã do dia  $D$  e relativas ao dia  $D+1$ , o agente OS determina e publica os preços

estabelecidos para cada um dos 24 intervalos bem como o  $LMP^2$  associado a cada um desses intervalos, como resultado da gestão de congestionamentos da rede elétrica. No final do dia D e com base nos preços estabelecidos, o agente OS define o agendamento de compromissos a ter efeito no dia seguinte. Posteriormente, ainda durante o dia D, cada agente GenCo com base no sucesso da sua proposta, decide o que modificar na próxima proposta a ser enviada [30].

Com o intuito de explicar sucintamente o processo, será colocada a hipótese de duas centrais produtoras de energia  $GenCo_1$  e  $GenCo_2$  fornecerem eletricidade a um agente comercializador  $LSE_3$  a preços diferentes ( $P_{GenCo_1} < P_{GenCo_2}$ ). Coloque-se a questão: A procura associada a  $LSE_3$  será totalmente fornecida pelo agente que pratica o preço mais baixo? A solução não é linear pois, como já referido, o mercado de energia elétrica possui limitações físicas que dificultam as otimizações económicas e, mesmo com capacidade de produção infinita, o agente  $GenCo_1$  pode não conseguir satisfazer a procura total visto encontrar-se limitado pela capacidade máxima suportada pela linha onde se realiza o transporte de energia elétrica entre dois nós do sistema.

Considerando uma procura global de  $y > x$  e uma capacidade máxima do cabo entre  $GenCo_1$  e  $LSE_3$  dada por  $x$ , a energia máxima fornecida pelo agente mais económico será sempre  $y \leq x$ , sendo a parte restante satisfeita pelo agente com preços mais elevados, ou seja,  $GenCo_2$ .

O objetivo do agente OS é então a resolução do problema base, referido acima como DC-OPF, com o intuito de maximizar o valor do ganho global (TNS), considerando as limitações impostas pelo sistema [31].

## 2.4.2 EMCAS

O simulador *Electricity Market Complex Adaptive System* (EMCAS), desenvolvido pelo *Argonne National Laboratory*, pertencente ao Centro de Energia, Ambiente e Sistemas de Análise Económica, é um simulador multi-agente implementado com recurso à plataforma REPAST. O seu desenvolvimento surgiu com o intuito de estudar a reestruturação do setor elétrico e as implicações da concorrência nas variações dos preços, bem como avaliar os limites operacionais e respetivos

---

<sup>2</sup>O software AMES utiliza o  $LMP_k$  como o menor custo adicional para obter/ceder um  $MW$  extra ao valor definido pela procura, no  $Bus_k$ , de qualquer agente produtor, independentemente da localização do mesmo [31].

critérios de segurança da rede [32]. Este simulador é muito utilizado pelo setor elétrico, sendo frequentemente usado pela REN para analisar o MIBEL [33].

Com recurso ao EMCAS, o utilizador pode simular o comportamento dos agentes em vários tipos de MEEs, nomeadamente o mercado em bolsa e a contratação bilateral, contemplando ainda as limitações operacionais do sistema. Os agentes representam produtores, consumidores, o operador de mercado, o operador de sistema, entidades de transmissão e entidades de distribuição. Estes agentes possuem a capacidade de adaptar o seu comportamento em prol dos sucessos ou falhas de ações anteriores, possuindo capacidades de decisão, aprendizagem e adaptação, de forma a explorarem as diversas estratégias de licitação disponíveis [23], [34]. A capacidade de decisão baseia-se na informação histórica privada de cada agente e na informação pública disponível, referente ao mercado e aos outros agentes participantes no mercado [35].

### 2.4.3 MASCEM

O software MASCEM é um simulador multi-agente desenvolvido através da plataforma OOA, com recurso à linguagem de programação JAVA. O MASCEM foi desenvolvido pelo Grupo de Investigação em Engenharia do Conhecimento e Apoio à Decisão (GECAD) do Instituto Superior de Engenharia do Porto [36].

O MASCEM permite ao utilizador avaliar as decisões dos agentes participantes, sendo um simulador de apoio à tomada de decisão, em diferentes mercados, sendo de realçar o mercado em bolsa e a contratação bilateral. A modelação de agentes é baseada em técnicas de inteligência artificial, sendo contemplados no simulador agentes produtores, consumidores, retalhistas, operador de mercado, operador de sistema e um agente “*facilitator*” cuja missão é coordenar e monitorizar as simulações do MEE [37].

A simulação ocorre com recurso a diferentes estratégias de licitação, podendo ser estratégias dinâmicas que variam com o tempo, estratégias dependentes do comportamento dos restantes participantes, estratégias com base em informação histórica relativa ao mercado, bem como informação histórica associada às decisões dos diversos agentes [36].

#### 2.4.4 NEMSIM

O simulador *National Electricity Market Simulation System* (NEMSIM), representativo do MEE Australiano, é um *software* composto por agentes computacionais autónomos, adaptáveis e com capacidade de aprendizagem, fazendo parte do programa de investigação *CSIRO's Energy Transformed Flagship* [38].

Os agentes representam produtores, consumidores e um representante da rede elétrica a estudar. O NEMSIM permite estudar diferentes tipologias de mercado, como o mercado em bolsa e a contratação bilateral de energia elétrica, tendo sido desenvolvido com o intuito de apoiar a decisão através da análise de diferentes estratégias de negociação, tendo em conta os efeitos promovidos por alterações às regras ou condições de mercado. O facto de permitir simular resultados em prol de alterações de mercado permite ao utilizador prever, razoavelmente, o sucesso das suas decisões.

Os agentes são autónomos, adaptáveis e possuem capacidades de aprendizagem, o que origina uma tomada de decisão dependente dos objetivos e das alterações do mercado e/ou comportamento dos restantes agentes [38].

#### 2.4.5 SEPIA

O software *Simulator for the Electric Power Industry Agents* (SEPIA) foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia de Honeywell e pela Universidade de Minnesota. É um simulador específico para o MEE, mais concretamente para o modelo de contratação bilateral. É baseado em agentes e procura analisar o comportamento das entidades participantes no MEE.

O SEPIA especifica as localizações das potências (de geração e de carga) e contabiliza as limitações operacionais do sistema, estando munido da capacidade de prever desvios aos critérios de segurança estabelecidos. Os agentes visam modelar componentes físicas, nomeadamente entidades produtoras, consumidoras e o operador de sistema.

De forma sucinta, os agentes consumidores fornecem o perfil de cargas, isto é, os valores da procura de energia elétrica. Posteriormente, interagem com as entidades produtoras para definirem os termos e condições dos contratos bilaterais, recebendo para o efeito as propostas de oferta de energia, especificando o

## 2.4. SIMULADORES MULTI-AGENTE DE MERCADOS DE ENERGIA

---

preço e a quantidade a ser transacionada. Os agentes produtores possuem também um módulo adaptativo, com componente de aprendizagem *Q-learning*, em prol da otimização das suas curvas de oferta [39]. Após alcançarem um acordo, os agentes informam o operador de sistema, responsável por averiguar o cumprimento dos critérios de segurança da rede, agendamento das transações e posterior comunicação da aprovação [32].



## SIMULADOR DE MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA

O capítulo apresenta a ferramenta computacional SIMEEL, desenvolvida no âmbito da presente dissertação, com o intuito de possibilitar o estudo detalhado do mercado em bolsa (ou *spot*) de energia elétrica. Será apresentada a interface gráfica do simulador, bem como os dois algoritmos de cálculo de preços implementados.

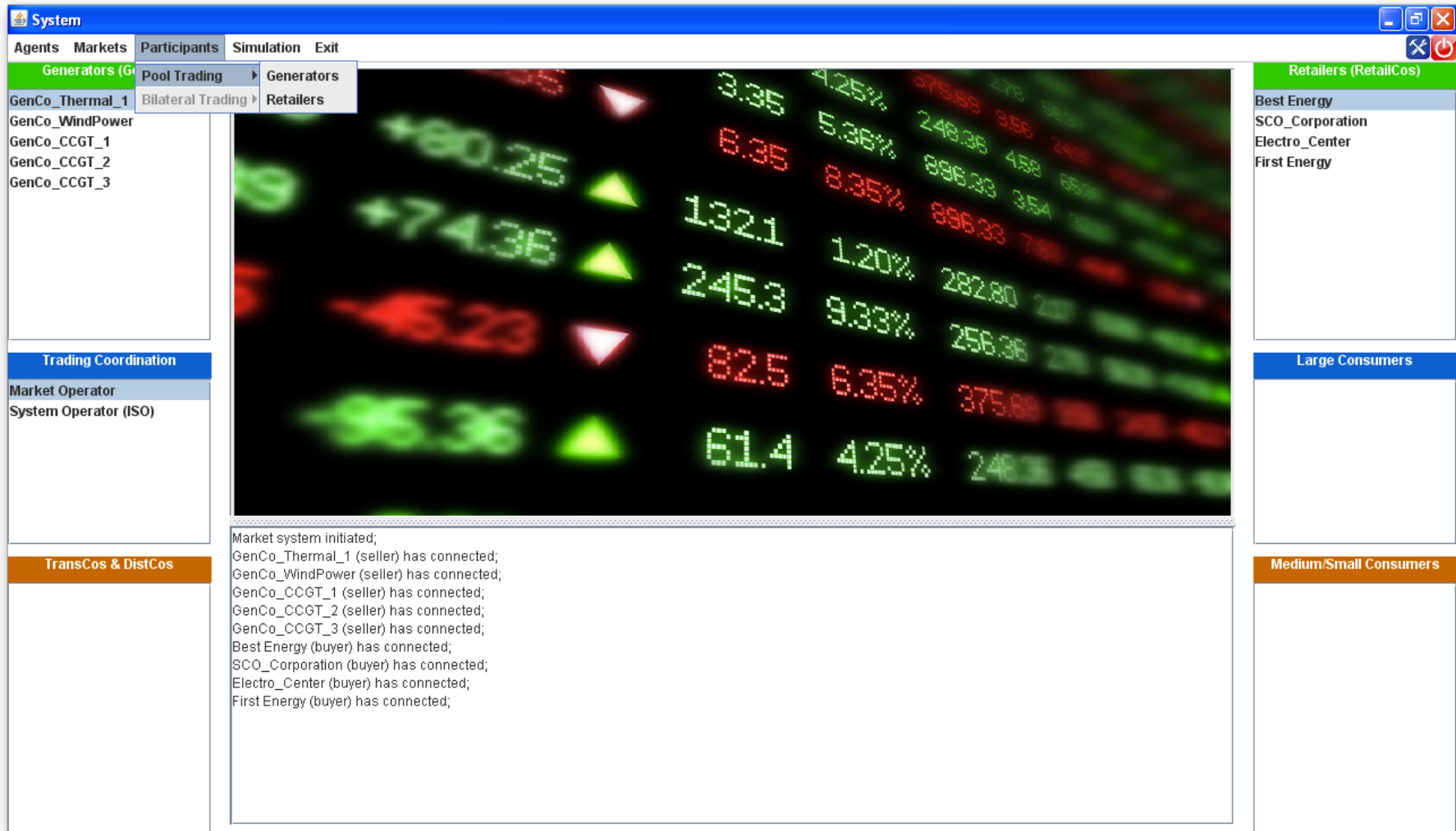


Figura 3.1: SIMEEL - Janela principal do simulador

## 3.1 Interface Gráfica Principal

O “Simulador de Mercados de Energia Elétrica” pode ser descrito como uma aplicação computacional com capacidades de simulação adaptadas ao mercado bolsista de energia elétrica e desenvolvido com o intuito de apoiar a decisão dos agentes participantes. A linguagem de programação escolhida foi o *Java* e a plataforma seleccionada para o seu desenvolvimento foi o *NetBeans IDE*. A ferramenta computacional SIMEEL visa aumentar as capacidades do simulador multi-agente MANREM (simulador desenvolvido com recurso à plataforma de sistemas multi-agente JADE, apresentada na secção 2.3.2.1).

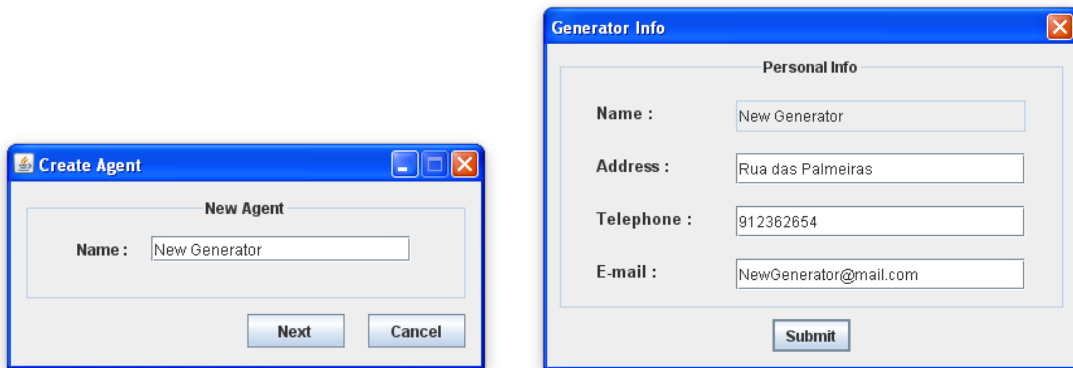
O simulador SIMEEL permite recriar o mercado bolsista de energia elétrica nas vertentes de mercado diário e intradiário, descritas na secção 2.2.2.1 e 2.2.2.2, respetivamente. Esta ferramenta possibilita também a análise do mercado sob diferentes algoritmos de cálculo de preços, nomeadamente os modelos de preço marginal único (SMP, em vigor no MIBEL) e de preço marginal local (LMP).

Para a realização da simulação e conseqüente obtenção de resultados, uma sequência de processos necessita de ser executada com o propósito de configurar as variáveis de sistema dos agentes, o modelo de mercado a estudar, o algoritmo de cálculo de preços, os dados associados à oferta a enviar para o mercado por parte dos diversos participantes e, mediante o algoritmo seleccionado, a configuração das características da rede elétrica.

Observando a estrutura da janela principal, apresentada na figura 3.1, é possível verificar a existência de uma barra de opções localizada na parte superior, permitindo ao utilizador escolher diferentes menus como:

- Menu Agentes;
- Menu Mercados;
- Menu Participantes;
- Menu Simulação.

Apresenta-se de seguida uma descrição detalhada dos principais menus.



(a) Criação do agente

(b) Introdução dos dados do agente criado

Figura 3.2: Janelas de introdução de dados para a criação de agentes

### 3.1.1 Menu Agentes

O menu “Agentes”, presente no menu superior do SIMEEL, permite a criação de novos participantes de mercado com base no preenchimento dos campos ilustrados na figura 3.2, ou através do carregamento de ficheiros *xml* previamente definidos. Para a análise do mercado bolsista de energia, independentemente do modelo de mercado e/ou algoritmo seleccionado, é necessária a criação de agentes computacionais compradores e retalhistas (definidos no *software* por *Generators* e *Retailers*, respetivamente). Para adicionar cada agente corretamente, dados como o seu *Nome*, *Morada*, *Contacto Telefónico* e *E-mail* necessitam de ser fornecidos, como ilustrado pelas figuras 3.2(a) e 3.2(b).

Após a criação correta dos agentes participantes, é necessário seleccionar o modelo de mercado a recriar, através das opções disponíveis no menu “Mercados”, que vão ser apresentadas na secção seguinte.

### 3.1.2 Menu Mercados

O menu “Mercados” permite seleccionar o modelo de mercado para o qual será feito o estudo. Este menu apresenta opções relativas ao mercado de energia em bolsa e ao modelo de contratação bilateral, tais como o *Energy Markets*, *Ancillary-service Market*, *Transmission-rights Market*, *Capacity Market*, *Forward Market*, *Futures Market* e *Options Market*.

De entre a vasta gama de opções apresentadas, a contribuição do simulador SIMEEL encontra-se representada pelos modelos de mercado associados à opção *Energy Market*, mais concretamente os modelos de mercado diário (*Day-Ahead Market*) e mercado intradiário (*Intraday Market*). Estes dois modelos possibilitam uma análise mais completa do mercado do dia seguinte, bem como do mercado de ajustes, essencial ao correto funcionamento do setor elétrico.

Com o intuito de alargar as opções de simulação oferecidas, os dois modelos associados ao mercado bolsista de energia elétrica encontram-se desenvolvidos com base em dois algoritmos diferentes para o cálculo de preços, nomeadamente os algoritmos de preço marginal único (SMP) e de preço marginal local (LMP). Desta forma, é necessário realçar a capacidade de adaptação do simulador SIMEEL a diferentes condicionalismos de mercado.

#### 3.1.2.1 Mercado diário

A opção pelo modelo de mercado diário, descrito na secção 2.2.2.1, permite ao utilizador simular os preços e os compromissos de energia a transaccionar para as 24 horas do dia seguinte ao da negociação.

Como tem sido descrito ao longo do presente documento, o SIMEEL permite ao utilizador analisar o mercado de energia elétrica com base nos algoritmos de preço marginal único e preço marginal local. Ao optar por este modelo de mercado, é então necessário especificar qual o algoritmo de cálculo de preço a utilizar, como ilustrado pela figura 3.3.

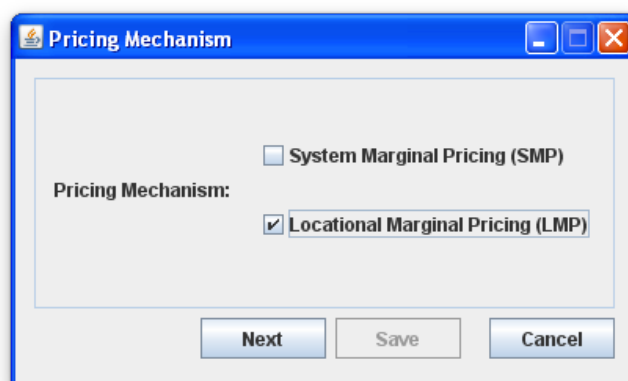


Figura 3.3: Escolha do algoritmo para cálculo de preço de mercado

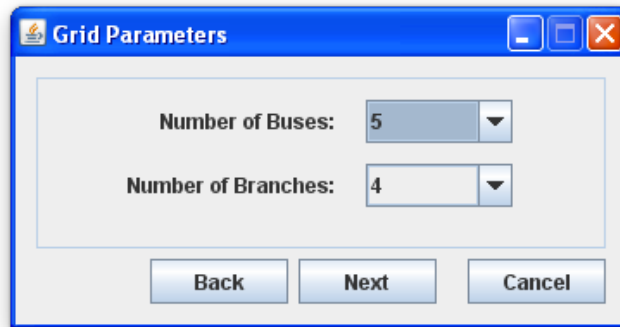


Figura 3.4: Definição do número de nós e ligações da rede elétrica — algoritmo LMP

Se a opção seleccionada é o SMP, para submeter a informação é apenas necessário seleccionar o botão *Save*. Caso seja seleccionada a opção LMP, dado o facto deste algoritmo realizar o cálculo de preços de mercado com base no custo marginal dos diversos agentes e em função do risco de congestionamentos, é necessário definir as características da rede elétrica.

As janelas “Parâmetros da rede” e “Parâmetros das ligações” (figs 3.4 e 3.5), permitem definir a estrutura e características da rede elétrica para a qual se efetua

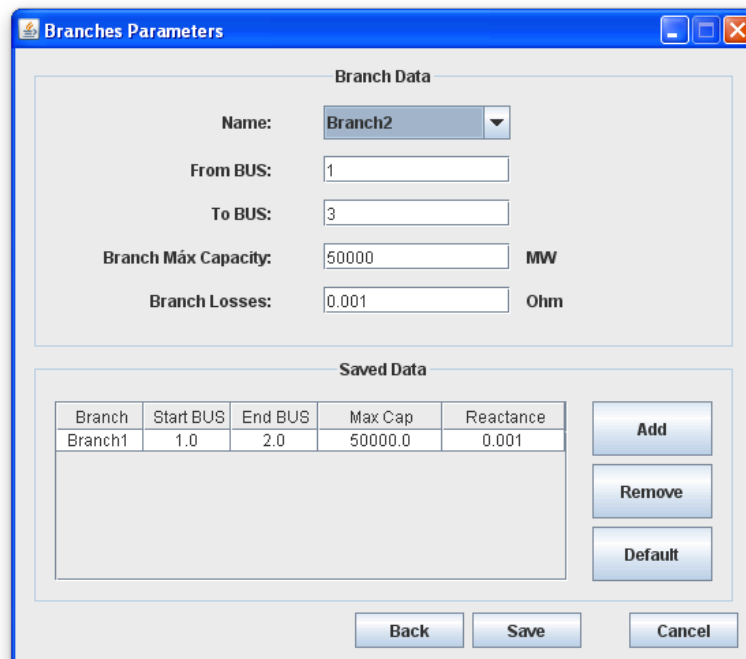


Figura 3.5: Definição das características das ligações na rede — algoritmo LMP

o estudo, sendo assim possível utilizar o simulador para a análise de um amplo número de cenários. A figura 3.4 possibilita a definição das características mais gerais da rede como o número de nós e o número de ligações entre eles, enquanto a figura 3.5 permite a especificação das características de cada uma das ligações existentes entre nós. Os dados necessários são os nós de partida e término da ligação, bem como a capacidade máxima de transporte (*Branch Máx Capacity*) e o valor total de perdas (*Branch Losses*). Estes parâmetros consideram valores globais, ou seja, valores independentes do número de linhas elétricas existentes entre os dois nós da rede elétrica. Após a especificação desses parâmetros, é então possível ao utilizador submeter os dados introduzidos, os quais serão posteriormente utilizados para recriar o mercado e permitir a obtenção de resultados.

### 3.1.2.2 Mercado Intradiário

A opção de mercado intradiário, como descrito na secção 2.2.2.2, permite aos agentes participantes o acesso ao mercado de ajustes, possibilitando a compra e venda de energia elétrica através da sua participação em diferentes sessões ao longo de um dia. De forma a permitir maior liberdade e aumentar a adaptabilidade do simulador a futuros casos de estudo, o módulo de mercado intradiário possibilita a especificação do intervalo temporal associado à sessão a analisar, como apresentado pela figura 3.6. A hora de fecho das sessões, à semelhança do que ocorre no MIBEL, é fixa e definida para a 24<sup>a</sup>. hora de cada dia.

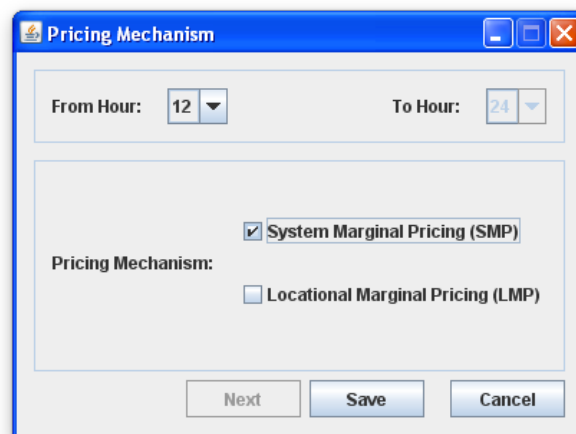


Figura 3.6: Escolha do método de cálculo do preço para o mercado intradiário

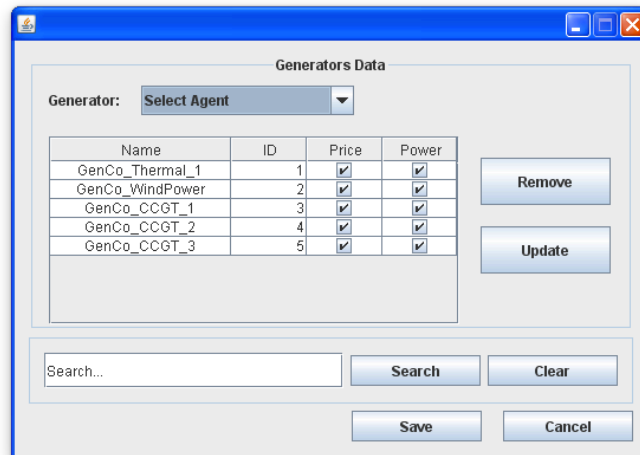


Figura 3.7: Janela global para criação de ofertas dos agentes — algoritmo SMP

### 3.1.3 Menu Participantes

Após a criação dos agentes no menu “Agentes” e a especificação do algoritmo de cálculo de preços, é possível definir os parâmetros integrantes da respetiva estrutura de oferta a ser enviada para o mercado. De modo a assegurar o preenchimento dos parâmetros específicos, serão apresentadas diferentes janelas em função do algoritmo seleccionado no menu anterior, “Mercados”. No menu “Participantes”, é também necessário seleccionar a categoria do agente, mais especificamente, produtor ou retalhista. De forma a possibilitar a realização da simulação, as duas classes de agentes necessitam de apresentar as suas estruturas de oferta devidamente preenchidas.

Caso o algoritmo escolhido para cálculo de preços de mercado seja o algoritmo SMP, a janela disponibilizada pelo simulador SIMEEL para os agentes produtores encontra-se ilustrada na figura 3.7. A janela destinada aos agentes retalhistas apresenta uma formato idêntico, apresentando apenas a palavra *Retailers* no local da palavra *Generators*.

Ao seleccionar o nome do agente para o qual se deseja definir os dados da oferta a enviar, a janela para preenchimento dos dados, ilustrada pela fig. 3.8, é apresentada ao utilizador. Esta janela é dinâmica em função do número de horas da sessão a analisar, sendo possível observar as diferenças entre as janelas 3.8(a) e 3.8(b) do simulador SIMEEL. Tal como referido anteriormente, é possível constatar a estrutura simples das ofertas.

Generator Name: GenCo\_Thermal\_1

Hour	Price [€/MWh]	Power [MW]	Hour	Price [€/MWh]	Power [MW]	Hour	Price [€/MWh]	Power [MW]
00	45.00	628.00	08	45.00	628.00	16	45.00	628.00
01	45.00	628.00	09	45.00	628.00	17	45.00	628.00
02	45.00	628.00	10	45.00	628.00	18	45.00	628.00
03	45.00	628.00	11	45.00	628.00	19	45.00	628.00
04	45.00	628.00	12	45.00	628.00	20	45.00	628.00
05	45.00	628.00	13	45.00	628.00	21	45.00	628.00
06	45.00	628.00	14	45.00	628.00	22	45.00	628.00
07	45.00	628.00	15	45.00	628.00	23	45.00	628.00

Default Cancel Submit

(a) Mercado Diário (00h - 24h)

Generator Name: GenCo\_WindPower

Hour	Price [€/MWh]	Power [MW]	Hour	Price [€/MWh]	Power [MW]
12	45.00	628.00	20	45.00	628.00
13	45.00	628.00	21	45.00	628.00
14	45.00	628.00	22	45.00	628.00
15	45.00	628.00	23	45.00	628.00
16	45.00	628.00			
17	45.00	628.00			
18	45.00	628.00			
19	45.00	628.00			

Default Cancel Submit

(b) Mercado Intradiário (12h - 24h)

Figura 3.8: Janelas para introdução de ofertas — algoritmo SMP

Caso o algoritmo escolhido para determinação de preços de mercado seja o algoritmo LMP, a janela a apresentar será idêntica à ilustrada na figura 3.9, para os agentes produtores e retalhistas, registando-se apenas a alteração dos campos *Generators* pela palavra *Retailers*, como indicado para o algoritmo SMP.

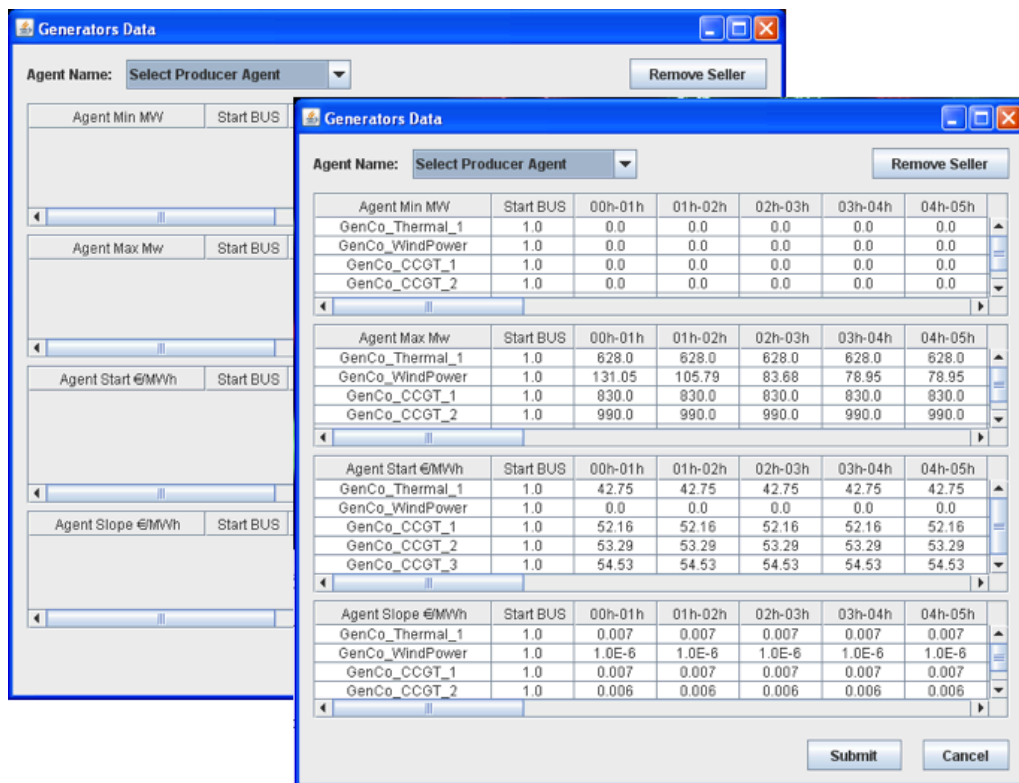


Figura 3.9: Janela global para introdução de ofertas — algoritmo LMP

À imagem do que foi descrito para a janela de introdução dos parâmetros de oferta simples (fig. 3.8), para definição da estrutura complexa de ofertas é apresentada uma janela dinâmica, ilustrada na figura 3.10, que varia em função do número de horas da sessão de mercado a analisar. Como se pode verificar, o número de parâmetros requisitados é superior, definindo a estrutura de ofertas utilizada pelo algoritmo LMP.

### 3.1.4 Menu Simulação

Este menu permite simular os diferentes modelos de mercado contemplados pelo simulador e definidos anteriormente. A ferramenta computacional SIMEEL, desenvolvida no âmbito da presente dissertação, visa estender as opções de simulação do simulador MANREM através da adição da opção para simulação de mercados em bolsa de energia elétrica.

O seu funcionamento, à semelhança de um operador de mercados, visa tratar as diversas ofertas recebidas pelos agentes produtores e consumidores, organizar as mesmas por ordem crescente de preços (para as ofertas dos agentes produtores)

### 3.1. INTERFACE GRÁFICA PRINCIPAL

Hour	Price [€/MWh]	Slope [€/MWh]	Min Power [MW]	Max Power [MW]	Hour	Price [€/MWh]	Slope [€/MWh]	Min Power [MW]	Max Power [MW]
00	42.75	0.007	0.0	628.0	12	42.75	0.007	0.0	628.0
01	42.75	0.007	0.0	628.0	13	42.75	0.007	0.0	628.0
02	42.75	0.007	0.0	628.0	14	42.75	0.007	0.0	628.0
03	42.75	0.007	0.0	628.0	15	42.75	0.007	0.0	628.0
04	42.75	0.007	0.0	628.0	16	42.75	0.007	0.0	628.0
05	42.75	0.007	0.0	628.0	17	42.75	0.007	0.0	628.0
06	42.75	0.007	0.0	628.0	18	42.75	0.007	0.0	628.0
07	42.75	0.007	0.0	628.0	19	42.75	0.007	0.0	628.0
08	42.75	0.007	0.0	628.0	20	42.75	0.007	0.0	628.0
09	42.75	0.007	0.0	628.0	21	42.75	0.007	0.0	628.0
10	42.75	0.007	0.0	628.0	22	42.75	0.007	0.0	628.0
11	42.75	0.007	0.0	628.0	23	42.75	0.007	0.0	628.0

(a) Mercado Diário (00h - 24h)

Hour	Price [€/MWh]	Slope [€/MWh]	Min Power [MW]	Max Power [MW]
12	42.75	0.007	0.0	628.0
13	42.75	0.007	0.0	628.0
14	42.75	0.007	0.0	628.0
15	42.75	0.007	0.0	628.0
16	42.75	0.007	0.0	628.0
17	42.75	0.007	0.0	628.0
18	42.75	0.007	0.0	628.0
19	42.75	0.007	0.0	628.0
20	42.75	0.007	0.0	628.0
21	42.75	0.007	0.0	628.0
22	42.75	0.007	0.0	628.0
23	42.75	0.007	0.0	628.0

(b) Mercado Intradiário (12h - 24h)

Figura 3.10: Janelas para introdução de ofertas — algoritmo LMP

e decrescente (para as propostas enviadas pelos agentes retalhistas). A organização crescente das ofertas de venda define a curva de oferta enquanto que a organização decrescente das ofertas de compra define a curva da procura. Tal como descrito na secção 2.1, o cruzamento destas duas curvas dá origem ao ponto de equilíbrio de mercado, definindo assim o preço e o volume de potência a transacionar.

Para o estudo apresentado no capítulo 4, o funcionamento do menu “Simulação” assenta no descrito, no entanto, o algoritmo LMP, dada a sua maior complexidade e o facto de ter em consideração o risco de congestionamento para o cálculo de preços, possui ainda o módulo “*open-source*” *DCOPF Solver (DCOPFJ)* [40], responsável por simular o comportamento de um operador de sistema, verificando e ajustando os resultados definidos pelo operador de mercado em função do risco de congestionamento no transporte de energia elétrica entre os diversos nós da rede.

## 3.2 Algoritmos de cálculo de preços de mercado

A presente secção visa apresentar as principais características dos algoritmos implementados no simulador. Para o estudo desenvolvido, o recurso aos dois algoritmos é justificado pela necessidade de explorar diferentes formas de licitação em mercados de energia elétrica. Dada a maior complexidade associada ao algoritmo de preço marginal local, este será apresentado com um pouco mais de detalhe. No entanto, a sua explicação será superficial visto não ser este o propósito do trabalho proposto.

### 3.2.1 Preço marginal único (SMP)

O algoritmo de preço marginal único, desenvolvido pela equipa do projeto MAN-REM, e adicionado ao sistema durante a presente dissertação, permite a simulação de mercado em bolsa. A estrutura das ofertas, como referido, contempla a hora a que se destina cada oferta, o preço de compra/venda e o volume de energia a transaccionar. Ao contrário do algoritmo de preço marginal local, apresentado na secção seguinte, o SMP não contempla as especificações da rede e, como tal, não possui a capacidade de verificar a existência de congestionamentos na mesma. O SMP é o algoritmo base utilizado pelo MIBEL para a definição dos valores estabelecidos para os mercados diários e intradiários.

### 3.2.2 Preço marginal local (LMP)

O algoritmo de preço marginal local, disponibilizado “on-line” [11], e adicionado ao sistema durante o trabalho da presente dissertação, permite a simulação de mercado em bolsa, na qual é atribuído um preço por hora, a cada um dos nós da rede elétrica. A sua estrutura, como referido, contempla um maior número de dados comparativamente ao algoritmo de preço marginal único, apresentando

diferenças relativamente ao tipo de agente, isto é, caso seja um agente produtor, a estrutura de ofertas, além da hora, é composta pelas capacidades mínima e máxima de geração da central, o preço inicial e a variável *slope* em representação da elasticidade do agente ao preço de mercado, influenciando positivamente o aumento do preço de venda licitado. O termo “elasticidade”, tal como descrito na secção 2.1.3, representa a sensibilidade do agente à variação do preço de mercado, ou seja, para ofertas enviadas ao abrigo do algoritmo LMP, o produtor não envia o preço de venda mas sim a função oferta, cujo valor depende do compromisso de produção estabelecido pelo mercado:

$$P = P_0 + x \cdot Q_{prod} \quad (3.1)$$

onde:

- $P$  representa o preço de venda para uma produção  $Q_{prod}$ , em [€/MWh];
- $P_0$  é o preço inicial [€/MWh];
- $x$  representa a sensibilidade do agente ao preço (parâmetro *slope* no SI-MEEL);
- $Q_{prod}$  é o compromisso de energia para a hora  $h$  [MWh].

A função “oferta” é descrita pela equação 3.1, segundo a qual o preço de venda  $P$ [€/MWh] varia entre  $P_0$  e  $P = P_0 + x \cdot Q_{MAX}$ , sendo  $Q_{MAX}$  equivalente à capacidade máxima de produção por agente produtor.

No sentido inverso, caso o agente seja do tipo retalhista, a estrutura da oferta a enviar para o mercado apresenta ligeiras diferenças, sendo constituída pela hora a que se destina, o valor da procura fixa, a procura máxima sensível ao preço de mercado, o preço de compra inicial e ainda a variável *slope* em representação da sensibilidade do agente retalhista ao preço de mercado, introduzindo uma tendência decrescente ao preço de compra licitado.

Com recurso ao módulo *DCOPFJ* [31], desenvolvido para estabelecer os valores de transações por intervalos temporais, com base nos problemas de fluxo de potência na rede e respectivas limitações físicas da mesma, é possível determinar os preços ao longo dos nós presentes na rede.

### 3.3 Interface gráfica — Visualização de resultados

Após realização da simulação, é apresentada a interface gráfica para visualização de resultados, como ilustrada na figura 3.11. Através desta janela é possível ao utilizador consultar, nos formatos de tabela ou gráfico, todos os dados de entrada do sistema, bem como os diversos resultados que o simulador permite obter. É assim possível consultar os dados gerais, os dados por agente ou por hora de simulação. À semelhança das janelas anteriores, a janela responsável pela apresentação de resultados é dinâmica e adapta-se ao horizonte temporal que se deseja analisar.

Como é possível verificar através da observação da figura 3.11, a janela encontra-se dividida, sendo a parte superior destinada aos dados de entrada, isto é, às ofertas enviadas pelos diversos agentes participantes. A zona inferior da janela encontra-se reservada para os dados obtidos após a simulação do mercado bolsista, sendo possível consultar os compromissos dos agentes produtores, o volume de energia a ser adquirida pelos agentes retalhistas, bem como os preços de mercado e as receitas associadas a cada um dos agentes produtores.

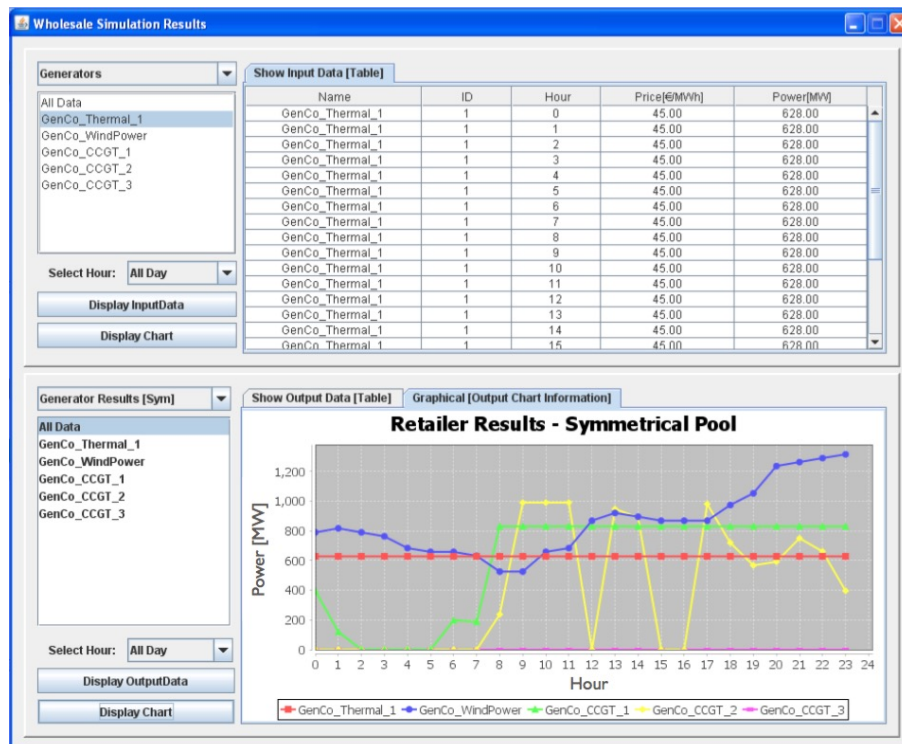


Figura 3.11: Apresentação de resultados para o mercado diário

**CASO DE ESTUDO:  
IMPACTO DE UMA PENETRAÇÃO ELEVADA  
DE ENERGIA EÓLICA NOS PREÇOS DO  
MERCADO DIÁRIO**

O presente capítulo apresenta um caso de estudo que ilustra o funcionamento do mercado em bolsa (ou *spot*) de energia elétrica, com particular realce para a estrutura das ofertas enviadas pelos diversos agentes participantes, pretendendo-se replicar, em computador, o impacto proveniente da licitação de energia eólica no mercado diário. Os resultados apresentados ao longo do capítulo foram obtidos com recurso ao simulador de mercados de energia elétrica SIMEEL, desenvolvido no âmbito da presente dissertação, e apresentado no capítulo 3.

## 4.1 Introdução

O caso de estudo envolve a definição de ofertas de compra e venda de energia, por parte dos diversos agentes participantes, possibilitando a análise do funcionamento do mercado diário de energia elétrica, o estudo do impacto provocado pela elevada penetração de energia eólica, e por fim a análise, ainda que simplificada, do simulador SIMEEL.

São considerados quatro cenários distintos. Os primeiros dois cenários visam recriar o mercado diário de energia elétrica com recurso ao algoritmo de preço marginal único. À exceção dos dados relativos ao produtor eólico, todos os restantes dados considerados são idênticos em ambos os cenários. Em relação aos volumes de geração eólica, e com o intuito de estudar o impacto provocado por uma elevada penetração de energia eólica em mercado em bolsa, o cenário I contempla um perfil de geração eólica reduzida, enquanto que o cenário II considera uma geração eólica elevada, possibilitando assim a obtenção e replicação de importantes conclusões com base na comparação dos resultados obtidos.

Os cenários III e IV apresentam objetivos idênticos aos cenários anteriores. Contudo, o funcionamento do mercado diário para estes cenários é baseado nas premissas do algoritmo de preço marginal local, para o qual se considera uma rede elétrica com capacidade infinita e perdas de transporte nulas, permitindo assim a obtenção de conclusões relativas à variação do perfil de geração eólica (sem outras condicionantes externas). A opção por este algoritmo de cálculo de preços visa não só analisar o módulo do simulador SIMEEL, como também analisar as variações introduzidas pela alteração da estrutura de oferta a enviar para o mercado.

Serão definidos dois perfis distintos de produção renovável, com base nos valores disponibilizados “on-line” pela REN. As ofertas de compra e venda enviadas pelos restantes agentes irão permanecer constantes ao longo dos diversos cenários, de forma a ser possível analisar os efeitos provocados pelo aumento da penetração de energia eólica.

## 4.2 Agentes Produtores de Energia

De forma a ser possível obter resultados adaptados à realidade atual, os grupos de produção assumem características semelhantes a centrais de produção reais e

Tabela 4.1: Características gerais dos agentes produtores

Nome	Recurso Energético	Pot. Instalada (MW)	Custo Marginal (€/MWh)
GenCo_Thermal_1	Carvão	628	45.00
GenCo_WindPower	Eólica	1500	0.00
GenCo_CCGT_1	Gás Natural	830	54.50
GenCo_CCGT_2	Gás Natural	990	56.12
GenCo_CCGT_3	Gás Natural	1176	57.90

funcionais em Portugal. Para os diversos cenários, como apresentado na tabela 4.1, consideraram-se cinco agentes, com características específicas, em representação de centrais de produção, apresentando diferentes custos de produção bem como diferentes tecnologias.

O agente *GenCo\_Thermal\_1* é constituído por dois grupos geradores, com potência total instalada de 628MW e para a qual se considerou um custo marginal de aproximadamente 45.00€/MWh. Tendo por base a figura 4.1, presente no relatório da ERSE [41], o valor definido para este produtor visa estabelecer um preço intermédio entre o custo marginal de referência calculado para centrais ciclo combinado a gás natural (CCGT) e o custo marginal definido para o produtor de energia eólica *GenCo\_WindPower*.

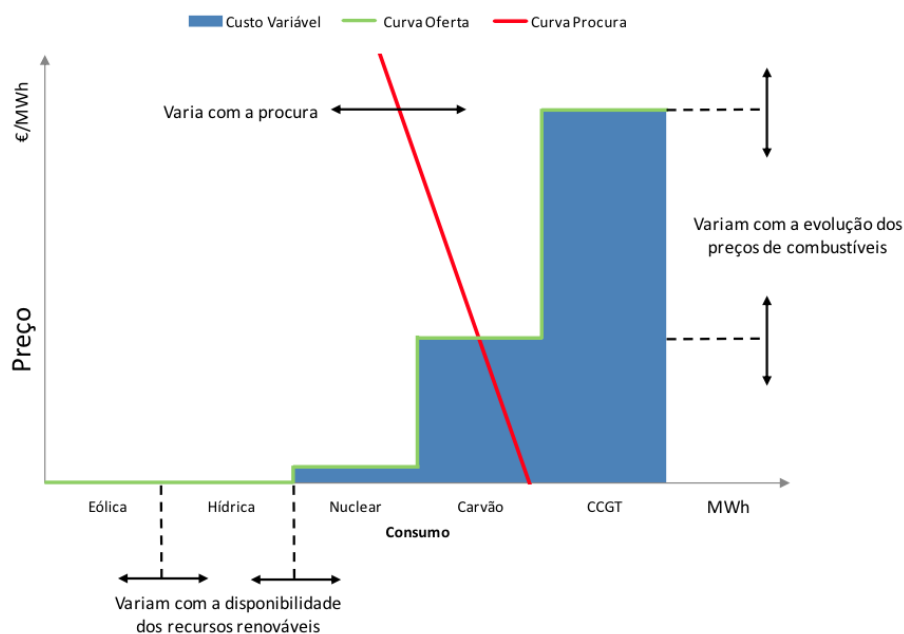


Figura 4.1: Curva da oferta por tecnologia de produção [41]

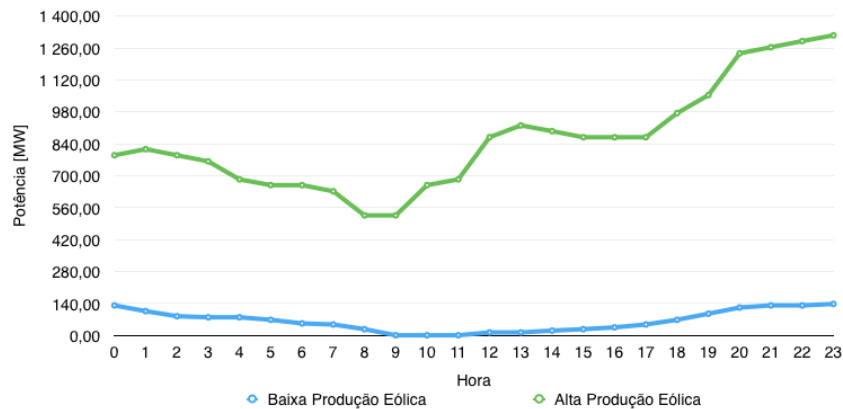


Figura 4.2: Perfis de produção do agente *GenCo\_WindPower*

O produtor *GenCo\_WindPower*, em representação de um grupo de parques eólicos, apresenta uma capacidade máxima instalada de aproximadamente 1500 MW. Considerou-se um custo marginal nulo, não sendo este valor representativo do custo normalizado de energia (LCOE) associado à geração eólica *onshore*, mas representando apenas o custo associado à produção de mais um MWh, não sendo portanto contabilizado o elevado investimento inicial, despesas de operação e manutenção (O&M) ou outras despesas associadas aos parques eólicos. Ao contrário do que ocorre com os produtores convencionais, os valores de geração disponíveis não equivalem à potência instalada, pois a geração eólica encontra-se dependente de condições não controladas, que condicionam os níveis de produção desejados.

O caso de estudo contempla dois perfis de produção eólica distintos, permitindo assim estudar e analisar os impactos de uma elevada geração eólica (ilustrados pela figura 4.2). Os valores de referência, apresentados na tabela 4.2, têm por base dois dias diferentes (dia 27/11/2014 e 23/04/2015), e encontram-se disponíveis “on-line” pela REN, estando também disponível para consulta o perfil diário de produção dos parques eólicos nacionais com telemedidas.

Tendo em consideração a potência total instalada e a informação presente no relatório da REN [42], é possível observar que no ano de 2014 a energia eólica representou 26% da potência instalada no SEN, valor superior ao registado em anos transatos. Com base nestes valores, e seguindo a tendência de crescimento registada nos últimos anos, considerou-se para o presente caso de estudo uma representação de 29% face à potência total instalada, como ilustrado na figura 4.3. O valor de potência instalada, foi calculado em proporcionalidade direta face ao valor total nacional, disponibilizado “on-line” pela REN [43].

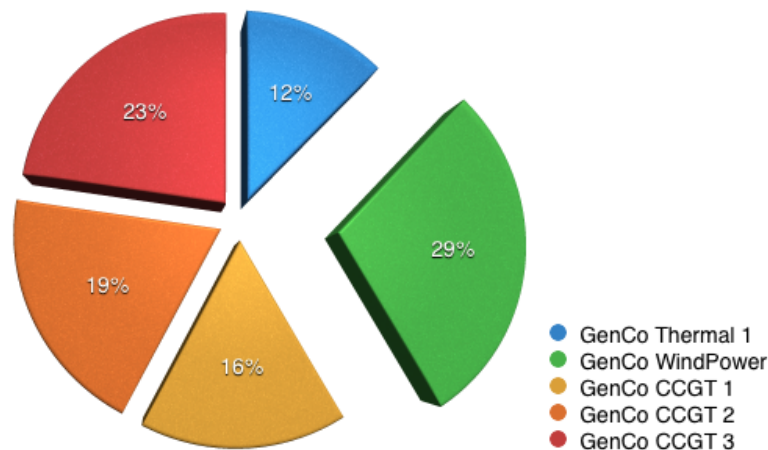


Figura 4.3: Percentagem de potência instalada por agente produtor

O produtor *GenCo\_CCGT\_1*, à semelhança dos restantes participantes com capacidades de geração, representa uma central CCGT, com dois grupos geradores e uma potência total instalada de 830MW. Os produtores *GenCo\_CCGT\_2* e *GenCo\_CCGT\_3* são constituídos por três grupos geradores, perfazendo uma potência total instalada de 990MW e 1176MW, respetivamente.

Tabela 4.2: Perfis de produção do agente *GenCo\_WindPower*

Hora	Baixa Prod. (MW)	Alta Prod. (MW)	Hora	Baixa Prod. (MW)	Alta Prod. (MW)
00	131.05	789.47	12	12.63	868.42
01	105.79	816.32	13	12.63	920.53
02	83.68	789.47	14	20.53	895.26
03	78.95	762.63	15	26.84	868.42
04	78.95	683.68	16	34.74	868.42
05	67.89	658.42	17	47.37	868.42
06	52.11	658.42	18	67.89	974.21
07	47.37	631.58	19	94.74	1053.16
08	26.84	525.79	20	121.58	1236.32
09	0.00	525.79	21	131.05	1263.16
10	0.00	658.42	22	131.05	1290.00
11	0.00	683.68	23	137.37	1315.26

O custo marginal para cada um dos produtores de CCGT foi calculado segundo a norma técnica para determinação do custo marginal de referência para centrais CCGT [44], publicada pela ERSE, na qual o custo marginal de uma central CCGT integra um conjunto de variáveis a serem contabilizadas, sendo de realçar o custo do gás natural, o custo das emissões de  $CO_2$ , o fator de emissão específico e os custos associados a O&M.

A expressão geral do custo marginal é definida por [44]:

$$Cmg_m^{CCGT} = \gamma_m \cdot Ref_m + PEUA_m^{t1} \cdot \sigma_S + OC_S \quad (4.1)$$

onde:

- $\gamma_m$  representa o parâmetro de eficiência relativa na utilização do gás natural. Este parâmetro assume um valor que varia em função do número de horas médio de utilização no mês;
- $PEUA_m^{t1}$  é a média das cotações diárias de fecho de mercado do mês anterior ao mês  $m$  do contrato futuro, para a transação de licenças nos EUA;
- $\sigma_S$  corresponde ao fator de emissão específico das centrais CCGT do sistema;
- $OC_S$  é o parâmetro de especificação de outros custos para as centrais CCGT, integrando os custos de operação e manutenção, sendo fixo no tempo;

Como é possível observar na norma técnica [44], o parâmetro  $Ref_m$  é dado pela seguinte expressão:

$$Ref_m = 0,2 \cdot BRT_m^{t3} + 0,5 \cdot PSUD_m^{t3} + 0,3 \cdot TTF_m^{t3} \quad (4.2)$$

Os parâmetros presentes na equação 4.2, com valores divulgados pela *Thompson Reuters*, correspondem à média das cotações diárias de fecho de mercado dos três meses anteriores ao mês  $m$ , para o preço de crude *Brent*, e o preço do gás natural nos nós virtuais de transação *PEG SUD* e *Title Transfer Facility (TTF)*, respetivamente.

Com base na média dos diversos parâmetros entre os meses de Abril de 2014 e Abril de 2015, foi possível estimar um custo marginal médio de referência para centrais CCGT, dado por  $Cm_{gm}^{CCGT} = 56,12\text{€/MWh}$ . Assumindo que os produtores CCGT possuem custos de O&M e eficiências distintas, consideraram-se assim os custos marginais apresentados na tabela 4.1.

### 4.3 Agentes Comercializadores (Retalhistas)

Relativamente ao agentes retalhistas (ou *retailers*), responsáveis pelas ofertas de compra de energia, foram considerados quatro participantes. De forma a definir agentes com diferentes percentagens de mercado, com recurso aos valores publicados pela REN [43], a procura média atribuída a cada retalhista reflete valores médios de carga de participantes reais. A figura 4.4 ilustra as percentagens de mercado atribuídas a estes agentes.

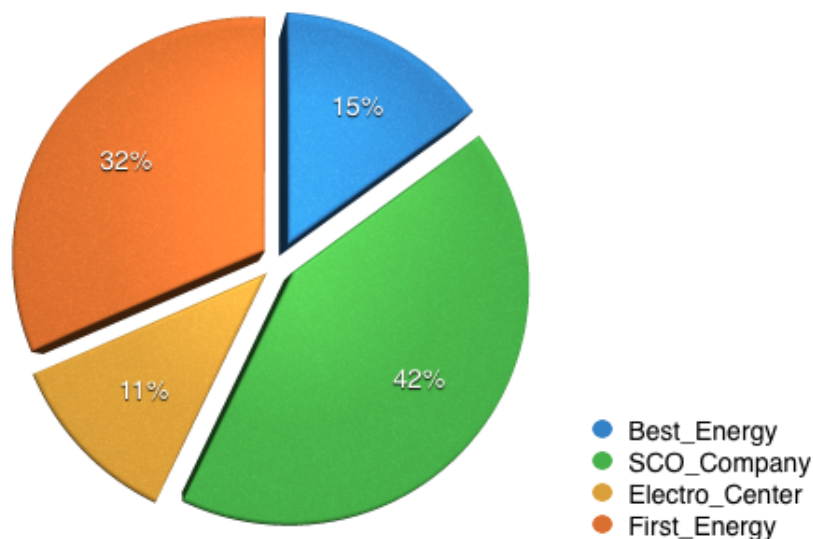
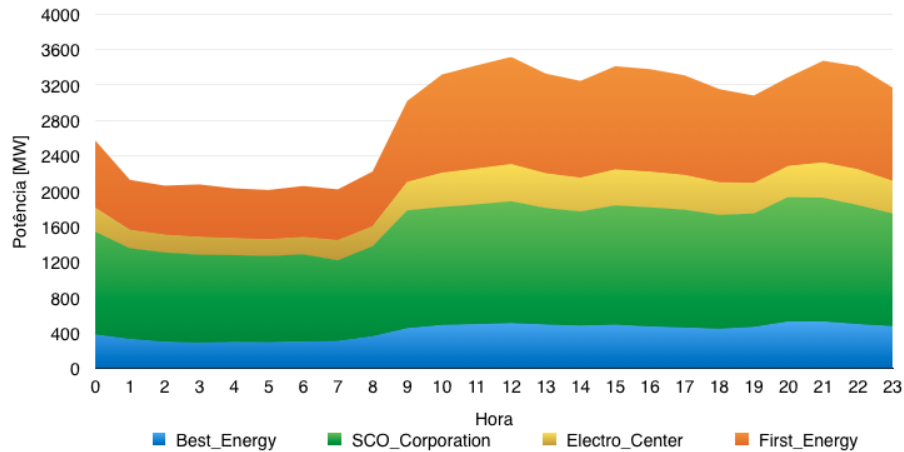
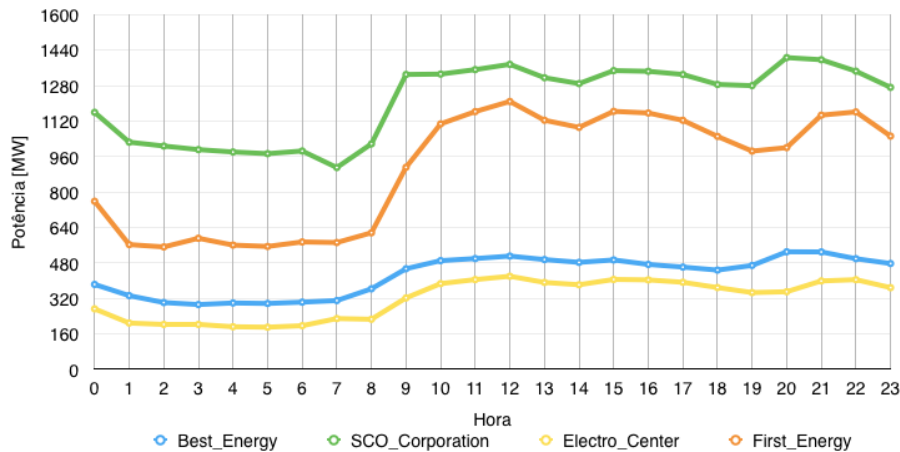


Figura 4.4: Percentagem de potência de carga por agente retalhista



(a) Diagrama de carga total para o dia D+1



(b) Diagrama de carga para o dia D+1

Figura 4.5: Diagramas de carga global(a) e individual(b), para o mercado diário

Tendo em consideração o funcionamento do mercado diário de energia elétrica e a necessidade de serem realizadas 24 ofertas para o dia seguinte ao da transação, foi definido um perfil de consumo para cada um dos quatro agentes. De forma a assegurar a menor discrepância possível face ao mercado real, e aumentar a robustez do modelo, os valores dos perfis de consumo considerados têm por base as variações do perfil de consumo nacional, disponibilizadas pela REN. Desta forma, e não sendo estes agentes o objeto central de estudo na presente dissertação, consideraram-se quatro dias úteis da semana, tendo sido atribuído o respetivo perfil a cada um dos agentes. Pese o facto do perfil de consumo apresentar valores globais, foi necessário adaptar os valores apresentados com recurso a uma regra de proporcionalidade direta, entre o total de consumo nacional e o valor médio de consumo estipulada para cada agente.

Os gráficos apresentados na figura 4.5 ilustram os perfis de consumo considerados, sendo possível observar uma diminuição esperada dos consumo durante o período noturno, entre as 00h e as 08h.

Os valores considerados para as ofertas de compra dos agentes retalhistas podem ser consultados na tabela C.1, apresentada no apêndice C. Os preços considerados encontram-se compreendidos no seguinte intervalo: [45.00€/MWh, 70.00€/MWh]. A variação escolhida para os preços permite a análise de diferentes resultados possíveis, contemplando a problemática do preço ser inferior ou superior à oferta de compra do agente retalhista. É ainda possível observar na tabela C.1 a discriminação de quatro preços diferentes, para cada agente retalhista, ao longo das 24 horas, motivada pela existência de diferentes tarifas (super vazio, vazio, cheia e ponta).

## 4.4 Cenários I e II: Estrutura de Ofertas Simples

Na presente secção são apresentados os dois primeiros cenários de geração eólica, possibilitando analisar o impacto do aumento da energia eólica disponível. Os resultados dos dois cenários são apresentados em simultâneo, permitindo a comparação de resultados e análise do impacto em função de dois níveis diferentes de geração eólica.

### 4.4.1 Descrição dos Cenários

Assente na descrição detalhada dos agentes produtores e retalhistas considerados para o desenvolvimento do presente caso de estudo, os valores considerados para os cenários I e II são apresentados pelas tabelas 4.1, 4.2 e C.1, do apêndice C.

A estrutura das ofertas a enviar pelos participantes é a de formato simples, e a simulação de mercado será efectuada sob as premissas do algoritmo de preço marginal único, em vigor no MIBEL, ou seja, a estrutura de cada oferta é constituída pela hora do mercado diário do dia seguinte ao da transação, o volume de energia a transacionar e o preço de compra/venda de energia. Como descrito no início do capítulo, os cenários I e II consideram a participação de cinco agentes produtores e quatro agentes retalhistas no mercado diário de energia elétrica. Com recurso à aplicação computacional SIMEEL, apresentada no capítulo 3, foi possível recriar

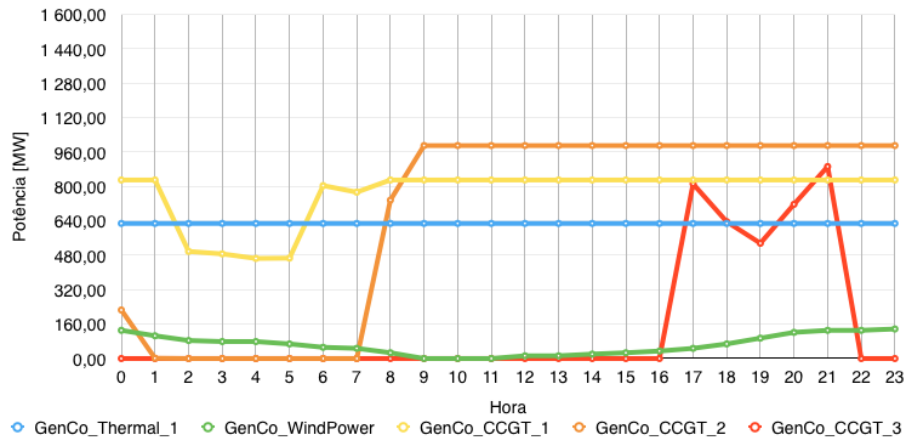


Figura 4.6: Cenário I - Diagrama de produção para baixo perfil eólico

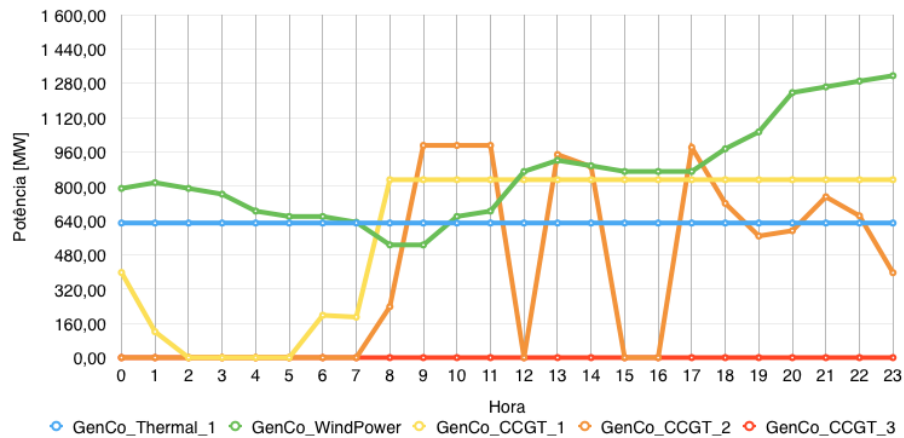


Figura 4.7: Cenário II - Diagrama de produção para alto perfil eólico

o mercado em bolsa e determinar os respetivos resultados, permitindo a comparação dos cenários e possibilitando a formulação de conclusões relativas ao impacto provocado por uma elevada penetração de energia eólica no mercado bolsista. Os resultados obtidos serão apresentados e analisados na secção seguinte.

#### 4.4.2 Análise de Resultados

Através da análise das figuras 4.6 e 4.7, e atendendo aos diferentes preços em função da tecnologia de geração, é possível observar que no cenário II o agente *GenCo\_CCGT\_3* tem um compromisso de produção nulo. É também observável que durante o período de menor procura, entre as horas 2 e 5, a energia produzida pelos agentes *GenCo\_Thermal\_1* e *GenCo\_WindPower* satisfaz toda a procura direccionada ao mercado. É então previsível que este intervalo temporal coincida com o período no qual o preço de mercado atingirá os valores mais baixos. As

#### 4.4. CENÁRIOS I E II: ESTRUTURA DE OFERTAS SIMPLES

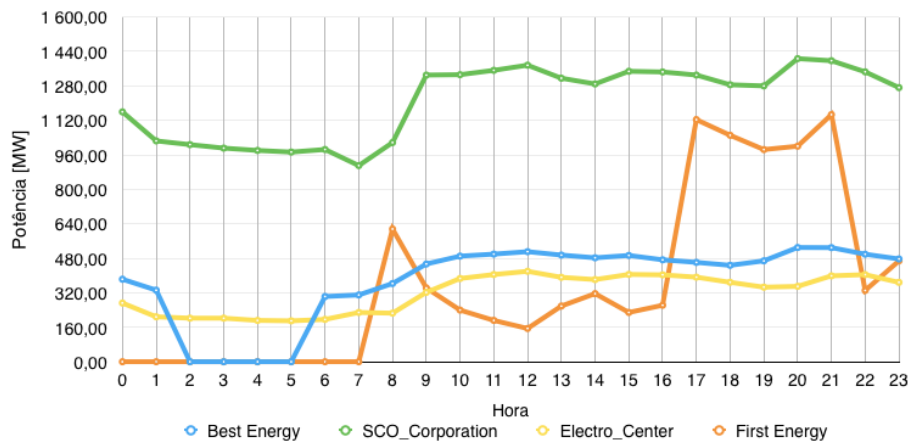


Figura 4.8: Cenário I - Diagrama de carga para baixo perfil eólico

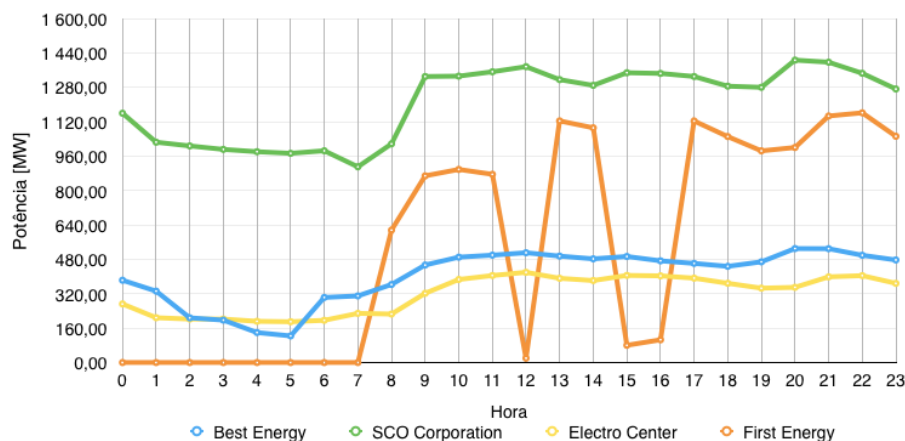


Figura 4.9: Cenário II - Diagrama de carga para alto perfil eólico

figuras A.1, A.2 e A.3, disponíveis no apêndice A, visam ilustrar de forma mais detalhada o impacto provocado pela variação da geração eólica nos diagramas de produção dos diferentes produtores.

Na ótica dos diagramas de carga dos agentes retalhistas, ilustrados pelas figuras 4.8 e 4.9, verifica-se um aumento dos volumes de energia adquiridos por parte dos agentes *Best Energy* e *First Energy*, tal como esperado para o cenário de alta geração eólica.

Observando estas figuras, verifica-se também a existência de períodos nos quais os volumes de carga são nulos, encontrando-se este efeito associado ao facto do preço de mercado praticado em ambos os cenários ser superior ao valor que os agentes *Best Energy* e *First Energy* atribuem à energia elétrica. As figuras C.1, C.2 e C.3, do apêndice C, ilustram de forma mais detalhada o impacto provocado

Tabela 4.3: Impacto da geração eólica no preço SMP de mercado

Hora	Cenário I (€/MWh)	Cenário II (€/MWh)	Hora	Cenário I (€/MWh)	Cenário II (€/MWh)
00	56.09	54.90	12	56.34	54.90
01	56.09	54.90	13	56.34	56.09
02	54.90	51.59	14	56.34	56.09
03	54.90	51.59	15	56.34	54.90
04	54.90	51.59	16	56.34	54.90
05	54.90	51.59	17	57.40	56.09
06	54.90	54.90	18	57.40	56.09
07	54.90	54.90	19	57.40	56.09
08	56.09	56.09	20	57.40	56.09
09	56.34	56.34	21	57.40	56.09
10	56.34	56.34	22	56.34	56.09
11	56.34	56.34	23	56.34	56.09

pelos aumentos da geração eólica nos diagramas de carga dos diferentes retalhistas. É também possível observar na tabela 4.3, e tal como esperado inicialmente, que o aumento da geração eólica contribui positivamente para a descida de preços.

A figura 4.10 ilustra o efeito introduzido pelo aumento dos volumes de energia eólica disponíveis. A principal variação ocorre entre as horas 2 e 5, período no qual o produtor *GenCo\_CCGT\_1* não produz qualquer volume energético, como confirmado pela figura 4.7. Esta quebra de produção associada ao agente produtor

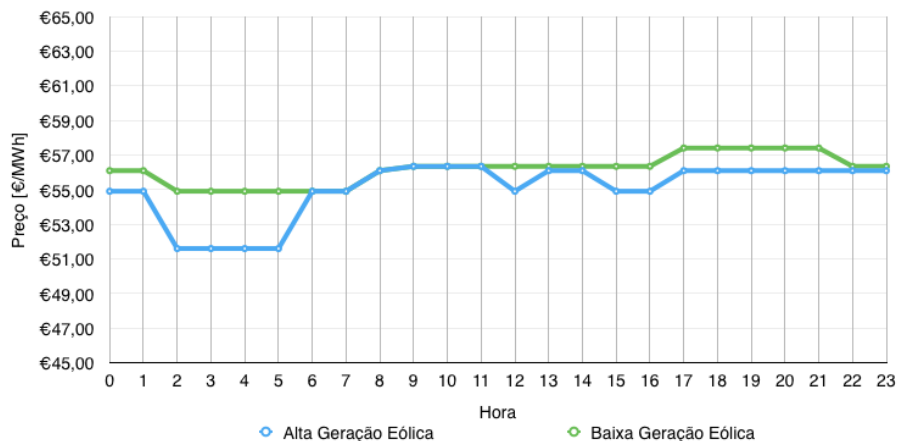


Figura 4.10: Impacto da geração eólica no preço SMP de mercado

#### 4.4. CENÁRIOS I E II: ESTRUTURA DE OFERTAS SIMPLES

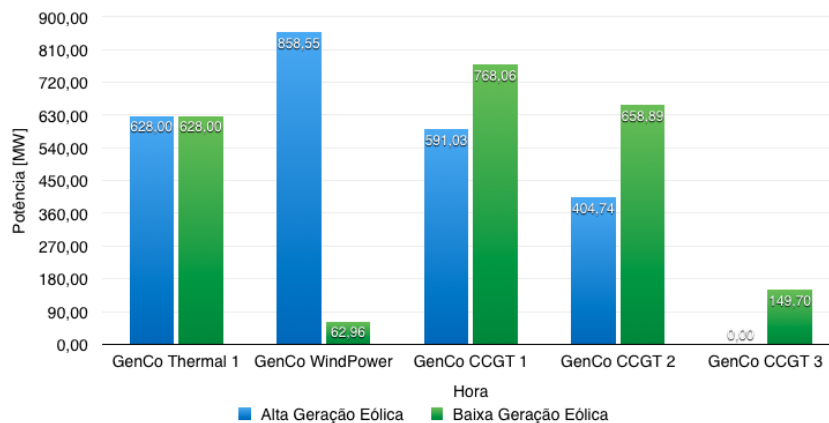


Figura 4.11: Impacto da geração eólica na produção média diária

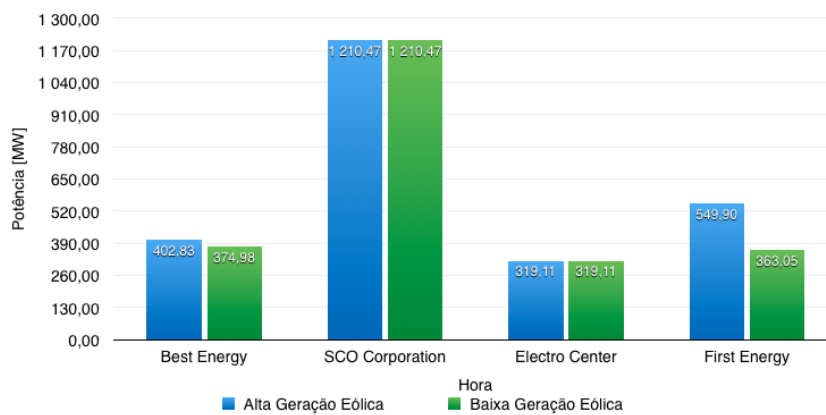


Figura 4.12: Impacto da geração eólica na procura média diária

com custos de produção mais elevados, resulta, tal como previsto, numa redução de preço mais significativa, de aproximadamente 3.31€/MWh para os cenários considerados.

Os preços obtidos no cenário I e II, até à hora 7, são superiores aos preços incluídos na proposta de compra do agente *First Energy*, resultando numa procura nula por parte deste participante do mercado. Observando de novo a figura 4.8, verifica-se que este efeito se encontra também registado no diagrama de carga do agente *Best Energy*, entre as horas 2 e 5, sendo o preço de mercado obtido para o cenário I superior à valorização máxima da energia elétrica atribuída por este agente.

De forma a observar a variação do compromisso de produção, por agente produtor entre os dois cenários, a figura 4.11 apresenta a diferença da produção média diária em função da variação de geração eólica. Como esperado para o

cenário I, a produção dos agentes CCGT é maior, dado o baixo nível de energia eólica disponível. Esse nível de produção, associado aos agentes com CMG mais elevados, influencia o preço e os volumes de energia que serão adquiridos pelos agentes retalhistas no dia seguinte à negociação, como é possível concluir através da análise da figura 4.12, que apresenta a variação da energia média diária adquirida em função da variação de energia eólica disponível.

## 4.5 Cenários III e IV: Estrutura de Ofertas Complexas

Os cenários III e IV possuem características similares às consideradas para os dois casos anteriores, utilizando, inclusive, os mesmos perfis de geração eólica. O cenário III visa representar o funcionamento do mercado diário com reduzida licitação de energia eólica e o cenário IV adota, à semelhança do cenário II, a simulação do mercado diário com elevada penetração de energia eólica.

### 4.5.1 Descrição dos Cenários

O fator diferenciador entre os cenários III e IV e os cenários I e II considerados na secção 4.4 encontra-se diretamente relacionado com a estrutura das ofertas enviadas para o mercado. A estrutura simples de ofertas será reformulada, dando origem a uma estrutura mais complexa, exigindo o recurso ao algoritmo LMP, presente no simulador SIMEEL. De forma a não desvirtuar o intuito inicial do presente caso de estudo, considerou-se para os cenários III e IV uma rede elétrica com capacidade de transporte infinita e um valor de perdas no transporte igual a zero, possibilitando estudar o impacto introduzido por uma elevada penetração da geração eólica no mercado em bolsa.

Com a alteração do formato das ofertas, foram realizadas algumas alterações nos dados iniciais dos participantes. Os novos valores associados aos agentes produtores encontram-se descritos na tabela 4.4, surgindo as variáveis  $P_0$  e  $P_{MAX}$  em representação de uma variação de  $\pm 5\%$  face aos valores considerados anteriormente. As ofertas de mercado são compostas pela hora a que se destinam, o preço inicial  $P_0$ , o volume de energia a transacionar, e a sensibilidade de cada agente à variação de preço, conceito descrito na secção 2.1.3.

Tabela 4.4: Cenários III e IV - Características gerais dos agentes produtores

Nome	Pot. Instalada (MW)	$P_0$ (€/MWh)	$P_{MAX}$ (€/MWh)	Sensibilidade (%)
GenCo_Thermal_1	628	42.75	47.25	0.7
GenCo_WindPower	1500	0.00	0.00	0.0
GenCo_CCGT_1	830	52.16	57.65	0.7
GenCo_CCGT_2	990	53.29	58.89	0.6
GenCo_CCGT_3	1176	54.53	60.27	0.5

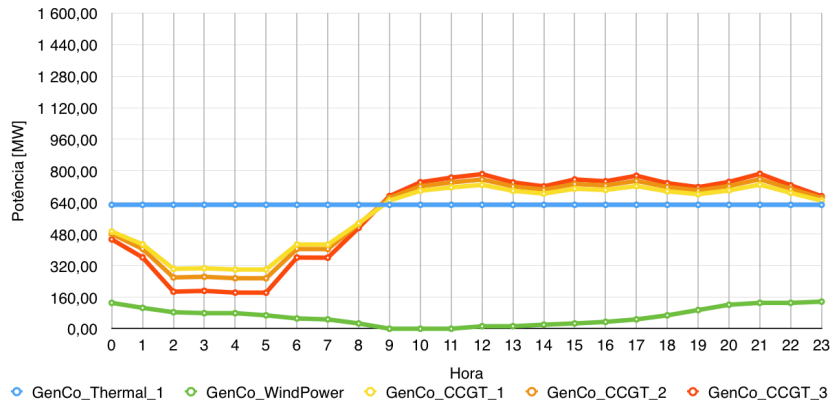
Relativamente à estrutura das ofertas de aquisição de energia enviadas pelos agentes retalhistas, existem diferenças que necessitam de ser realçadas, tendo sido atribuída uma sensibilidade de 0.5% para os quatro agentes considerados. Sendo a energia elétrica um bem essencial, e de difícil armazenamento, foi também introduzido o termo de “procura fixa” em representação do volume de energia que, a curto prazo, terá de ser obrigatoriamente adquirido por cada agente. Foi igualmente introduzido o termo de “procura máxima”, em representação do valor máximo de energia que cada agente deseja adquirir em função do preço de mercado, ou seja, o volume de energia compreendido entre a procura máxima e a procura fixa foi considerado sensível ao preço.

A estrutura de ofertas é agora composta pela hora a que se destina, o valor de procura fixa, o preço de compra, o valor da sensibilidade de cada agente ao preço de mercado e o valor máximo de procura. Os volumes de procura fixa e procura máxima encontram-se descritos na tabela D.1, do apêndice D, e representam uma variação de  $\pm 30\%$  face ao volume de procura considerado para os cenários I e II (tabela C.1).

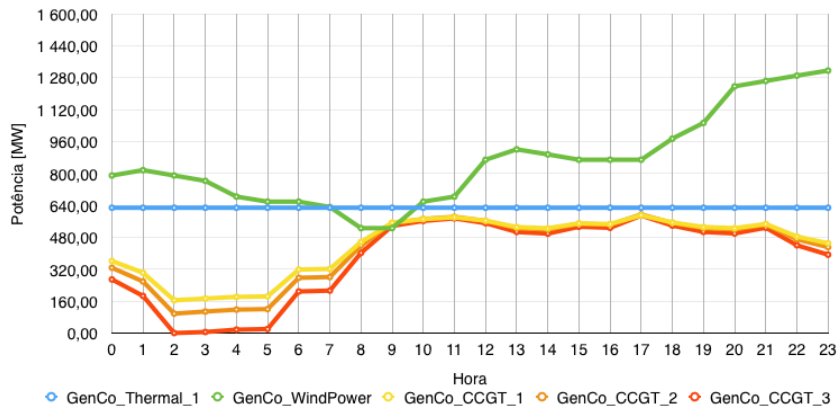
Com recurso à ferramenta computacional SIMEEL, foi possível obter os compromissos de produção para os cinco agentes produtores, os compromissos de aquisição de energia por parte dos agentes retalhistas, bem como o preço de mercado em função dos diferentes níveis de geração eólica considerados.

#### 4.5.2 Análise de Resultados

Os resultados apresentados na figura 4.13 ilustram o compromisso de produção para os cenários III e IV, respectivamente. Comparando os resultados obtidos nos dois cenários, é possível observar no cenário IV a diminuição dos volumes de produção associada aos agentes com tecnologia CCGT, face aos valores obtidos



(a) Cenário III - Baixa geração eólica



(b) Cenário IV - alta geração eólica

Figura 4.13: Diagramas de produção para os cenários III e IV

no cenário III, tal como esperado. As tabelas B.1 e B.2, do apêndice B, bem como a figura B.3, também do apêndice B, permitem constatar esta diminuição dos volumes de produção para cada um dos agentes CCGT considerados.

Realizando a comparação dos valores obtidos (fig. 4.13) com os resultados apresentados nos cenários anteriores (figs. 4.6 e 4.7), é possível constatar que, com base numa estrutura de preços complexa que varia em função do mercado, os agentes de tecnologia CCGT apresentam volumes de geração mais equilibrados entre si, evitando os níveis de produção nula apresentados anteriormente.

Tendo em consideração o objectivo de maximização do bem estar do sistema, por parte do OM, e o facto dos custos marginais associados aos agentes CCGT serem próximos entre si e variarem em função do número de lotes a produzir, é possível observar que os compromissos de produção atribuídos aos agentes CCGT

#### 4.5. CENÁRIOS III E IV: ESTRUTURA DE OFERTAS COMPLEXAS

Tabela 4.5: Impacto da geração eólica no preço LMP de mercado

Hora	Cenário III (€/MWh)	Cenário IV (€/MWh)	Hora	Cenário III (€/MWh)	Cenário IV (€/MWh)
00	59.06	57.22	12	62.37	60.04
01	58.14	56.39	13	61.95	59.60
02	56.41	54.46	14	61.74	59.51
03	56.45	54.58	15	62.09	59.86
04	56.36	54.70	16	62.00	59.80
05	56.36	54.73	17	62.28	60.42
06	58.14	56.61	18	61.91	59.91
07	58.13	56.66	19	61.71	59.60
08	59.64	58.54	20	61.97	59.52
09	61.25	59.90	21	62.38	59.81
10	61.95	60.15	22	61.80	58.93
11	62.19	60.28	23	61.25	58.46

são idênticos entre si. O facto do OM aumentar o compromisso de produção do agente marginal com menor preço origina uma subida do preço praticado por esse agente, deixando pois de ser o agente marginal com menor preço de venda. Desta forma, o próximo lote de energia a ser produzido será atribuído ao agente que apresente o menor preço. A repetição deste processo, à medida que se aumenta o compromisso global de produção, faz com que os três agentes apresentem perfis de geração semelhantes entre si, pois é esta a forma que assegura a maximização do bem estar global, por parte do operador de mercado.

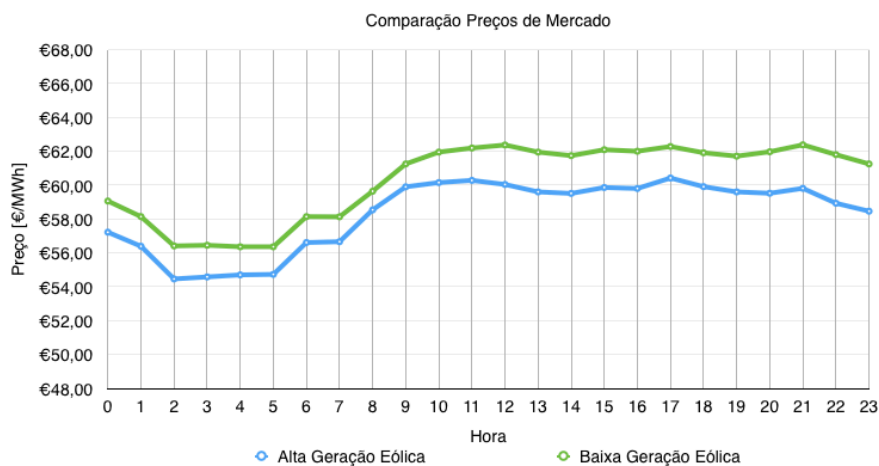
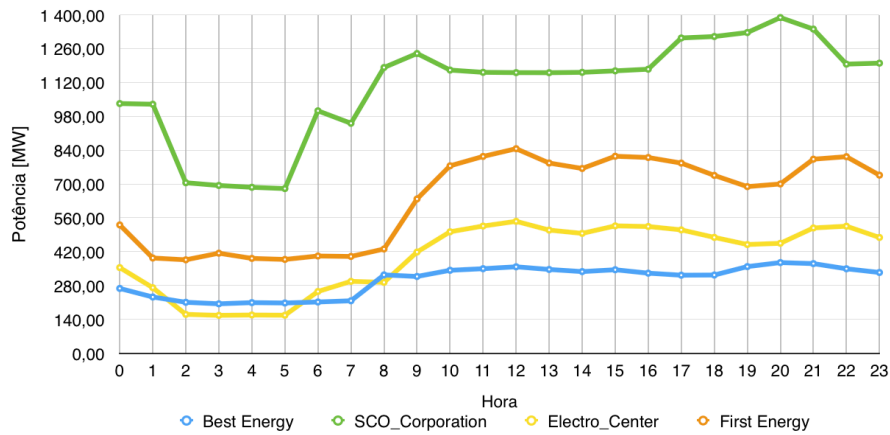
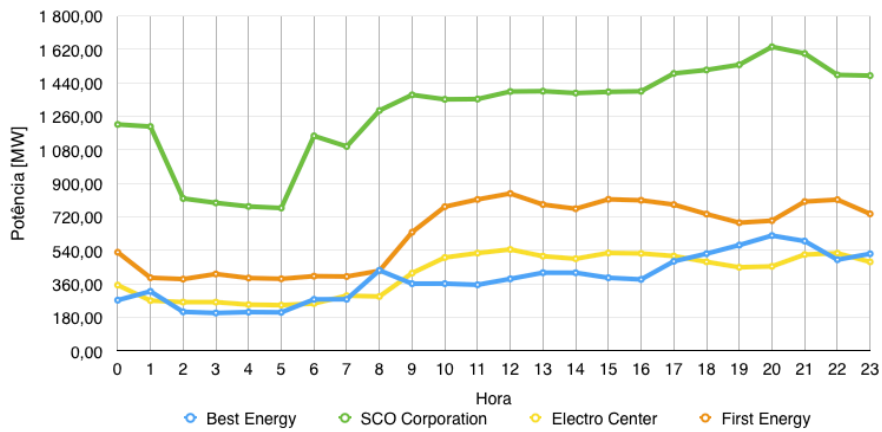


Figura 4.14: Impacto da geração eólica no preço (LMP) de mercado



(a) Cenário III - Baixa geração eólica

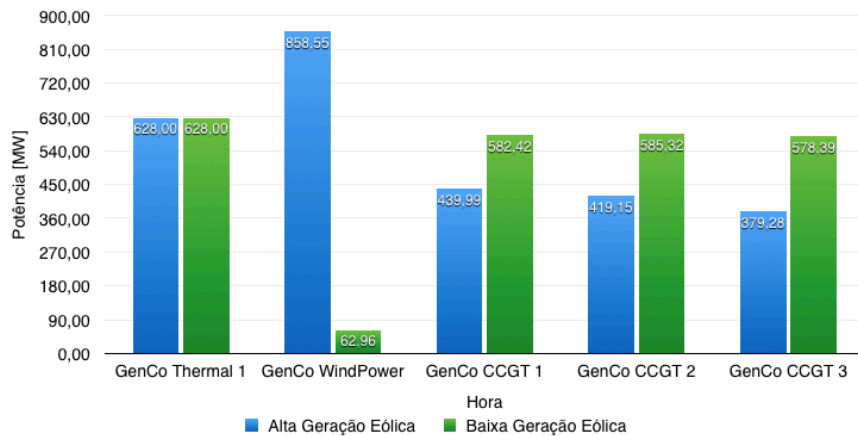


(b) Cenário IV - Alta geração eólica

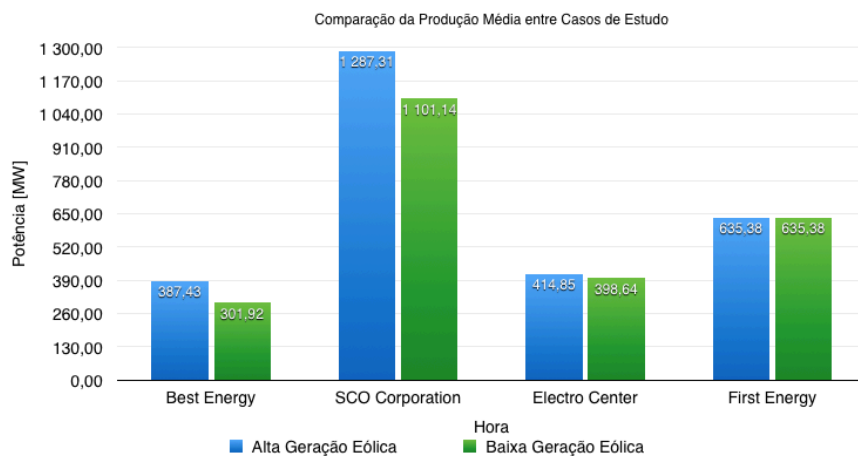
Figura 4.15: Diagramas de carga para os cenários III e IV

A variação dos volumes de geração eólica a licitar é responsável por importantes oscilações ao nível dos preços praticados, tal como previsto inicialmente. A tabela 4.5, ilustrada pela figura 4.14, apresenta os preços diferenciados para cada um dos cenários, sendo possível observar a ausência de preços comuns entre os cenários III e IV, ao contrário do registado na secção anterior (tabela 4.3). Apesar de ser possível comparar a tendência dos resultados obtidos entre a estrutura de oferta simples e a estrutura de oferta complexa, o mesmo não se aplica à comparação dos valores numéricos pois, como apresentado no início da presente secção, os preços praticados pelos agentes produtores não coincidem com os preços praticados no caso anterior.

#### 4.5. CENÁRIOS III E IV: ESTRUTURA DE OFERTAS COMPLEXAS



(a) Valores de produção média diária



(b) Valores de procura média diária

Figura 4.16: Impactos da geração eólica na produção e procura (cenários III e IV)

Tendo em consideração a variação dos preços de mercado em função dos volumes de geração eólica licitados no mercado diário, é espectável observar um aumento da procura no cenário IV, face ao registado no cenário III, pois com preços mais baixos a procura tem tendência a aumentar, tal como ilustrado pela figura 4.15 (os resultados detalhados são apresentados nas tabelas D.2 e D.3, do apêndice D). A figura D.3, igualmente apresentada no apêndice D, possibilita a comparação dos níveis de procura para o mercado diário, sendo possível verificar o seu aumento em função da redução de preço.

A variação da geração eólica licitada em mercado apresenta impactos ao nível dos compromissos de produção, preços de mercado e volumes de procura de energia. A figura 4.16 ilustra a variação dos volumes a produzir e a variação da procura de mercado em função do preço licitado, por agente retalhista, sendo

possível observar a diminuição do compromisso de produção dos agentes com tecnologia CCGT, em função ao aumento dos níveis de geração eólica. No sentido oposto, é possível verificar o aumento da procura média, por agente retalhista, em função do aumento dos níveis de geração eólica, e consequente diminuição do preço de mercado.

## 4.6 Principais Conclusões

Os diferentes cenários propostos permitem analisar as potenciais variações dos compromissos de mercado em resposta ao aumento do volume de energia eólica licitada no mercado em bolsa. É necessário realçar o facto de se realizar a comparação entre apenas dois cenários, nos quais existe variação dos níveis de geração eólica, ou seja, as principais conclusões baseiam-se na comparação dos resultados obtidos entre os dois cenários, para cada um dos algoritmos de cálculo de preço apresentados. Seguindo uma abordagem global, é esperado que os resultados obtidos no mercado em bolsa apresentem alterações significativas em função de um aumento de disponibilidade de energia eólica.

Como replicado computacionalmente em [12], os possíveis impactos motivados pelo aumento dos níveis de energia eólica licitada, incluem [13]:

- A geração variável, a qual integra a geração eólica, tende a diminuir os preços de mercado em função dos custos marginais reduzidos;
- Este tipo de geração pode originar períodos de preço de mercado nulo ou perto de zero, motivados de novo pelos custos marginais reduzidos;
- A variabilidade associada à geração renovável tende a impulsionar a inerente volatilidade registada nos preços da eletricidade adquirida no mercado em bolsa;
- A geração variável impulsiona a necessidade de centrais de geração mais flexíveis, podendo o mercado oferecer ou não incentivos suficientes para o efeito;

Como é possível observar através da análise dos resultados efectuada nas secções 4.4.2 e 4.5.2, os valores obtidos com base nas diferentes simulações confirmam estes efeitos.

Nos dois primeiros cenários, o aumento da penetração de geração eólica no mercado bolsista originou uma redução dos preços de mercado. Esta influência descendente nos preços acaba por despoletar efeitos, diretos e indiretos, de extrema importância para o equilíbrio e funcionamento do sistema.

Uma redução de preços de mercado implica também uma redução das receitas dos agentes convencionais, sendo de fácil percepção que o aumento da penetração de geração eólica influencia negativamente o compromisso de produção dos restantes agentes, em concordância com o verificado no mercado alemão [45]. Esta redução na geração revela-se ainda mais agressiva para as receitas, pois além da margem de lucro dos agentes convencionais ser menor, a diminuição dos compromissos de geração de energia sacrifica uma vez mais as receitas obtidas.

Do ponto de vista financeiro, esta redução motivada pelo aumento do volume de geração eólica, tende a reduzir a atractividade do mercado para os agentes cujo custo marginal seja mais elevado. Considerando que o aumento da penetração de geração variável impulsiona a necessidade de centrais mais flexíveis, esta redução de atractividade poderá conduzir à necessidade de serem atribuídos incentivos, de forma a assegurar a robustez do mercado, com capacidade de satisfazer a procura e compensar a inerente volatilidade associada à geração variável.

As diferenças relacionadas com os algoritmos utilizados permitem formular algumas conclusões curiosas pois, tal como é possível verificar através da comparação das figuras 4.7 e 4.13, os compromissos de produção relativos aos agentes que possuem custos marginais mais elevados revelam-se mais equilibrados entre si, durante as 24 horas seguintes ao dia da transação.

A definição de ofertas que variem com os níveis de compromisso, para o caso dos cenários III e IV, possibilita assim a distribuição do compromisso de produção em função da maximização do lucro global de sistema. Esta comparação de resultados permite observar, a título de exemplo, que o agente *GenCo\_CCGT\_3* possui um compromisso diferente de zero em 20 das 24 horas diárias, aumentando a receita obtida e originando uma diminuição menos agressiva da atractividade do mercado.



## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTO FUTURO

Este capítulo apresenta as principais conclusões resultantes do trabalho desenvolvido na presente dissertação. São também apresentadas algumas propostas de trabalho futuro com o intuito de melhorar o simulador MANREM e contribuir para o estudo do impacto de elevadas penetrações de energia eólica em mercado em bolsa de energia elétrica.

## 5.1 Síntese de Resultados

A liberalização do setor elétrico potencializou o desenvolvimento e crescimento dos mercados de energia elétrica. A abertura à concorrência deu azo ao aumento do número de entidades participantes e contribuiu positivamente para o incremento dos níveis de competitividade e eficiência nas atividades de produção e comercialização de energia elétrica. Tendo como exemplo o sector elétrico nacional, a sua liberalização contribuiu para o aumento de competitividade num mercado outrora vertical, baseado numa maior transparência de preços e bem estar para o consumidor final.

O crescimento dos níveis de competitividade, baseado num crescente número de entidades participantes no mercado, e consequente aumento de complexidade, resultou num acréscimo de dificuldades na previsão e estabilização de preços. De forma a ser possível prever o mercado, e na ótica de suporte à decisão, surgiu a necessidade de desenvolver ferramentas computacionais que ofereçam aos seus utilizadores a capacidade de recriar e analisar as diversas atividades associadas ao mercados de energia elétrica. Os sistemas multi-agente têm-se revelado benéficos para o estudo dos mercados de energia elétrica, pois possuem características essenciais, como a autonomia, a reactividade, a pró-actividade e a capacidade social, sendo assim possível replicar com maior proximidade, os comportamentos e estratégias das entidades participantes no mercado bolsista.

O principal objetivo da presente dissertação consistiu no desenvolvimento de um novo simulador — SIMEEL, que permite analisar o mercado em bolsa (ou *spot*) de energia elétrica, nomeadamente simular o funcionamento dos mercados diário e intradiário de acordo com os algoritmos de preço marginal único e de preço marginal local. O SIMEEL foi desenvolvido com recurso à linguagem de programação JAVA e o seu principal objetivo consiste em auxiliar o utilizador no suporte à decisão através da análise de mercado em bolsa e previsão de preços para o dia seguinte ao da negociação.

Após desenvolvimento do simulador proposto, o SIMEEL foi integrado no simulador MANREM, extendendo assim as suas capacidades e permitindo, após a integração, a capacidade de analisar o mercado de energia elétrica segundo os modelos de mercado em bolsa e de contratação bilateral. No âmbito da integração realizada, foi também desenvolvida uma interface genérica que possibilita uma utilização simples, homogénea e completa.

A aplicação do SIMEEL a vários cenários com diferentes produções de energia eólica permitiu ilustrar o seu funcionamento, como também possibilitou estudar o impacto de níveis elevados de geração eólica em mercado bolsista. Sendo esta uma tecnologia em crescimento visível, o estudo realizado permitiu analisar o impacto de níveis elevados de geração eólica com recurso à comparação dos resultados do mercado face a dois perfis diferentes de produção eólica. O estudo foi realizado para os dois algoritmos de cálculo de preço integrados no SIMEEL, nomeadamente os algoritmos SMP e LMP.

A análise dos resultados obtidos, independentemente do algoritmo escolhido, permitiu verificar que o aumento dos níveis de energia eólica disponível se traduz numa redução de preços de mercado, em função dos reduzidos custos marginais apresentados, bem como numa redução dos compromissos de produção associados aos agentes com custos marginais de produção mais elevados. Constatou-se também que a forte oscilação dos volumes de produção eólica motivam a necessidade de maior flexibilidade por parte dos restantes agentes participantes, de forma a contrariar períodos de carência de produção, visto ser uma geração baseada em recursos endógenos não controlados. Estes resultados permitiram concluir que o simulador SIMEEL possibilita recriar e simular o funcionamento do mercado em bolsa, revelando-se uma ferramenta importante para o apoio à tomada de decisões, acrescentando assim valor e robustez ao simulador MANREM.

## 5.2 Desenvolvimento Futuro

Em termos de trabalho futuro, com o intuito de melhorar o simulador MANREM e aprofundar o estudo realizado na presente dissertação, algumas linhas de desenvolvimento podem ser seguidas, de forma a contemplar importantes temáticas e conferir ao simulador maior realismo e robustez. Algumas das linhas de desenvolvimento a seguir são:

- Desenvolver a capacidade de aprendizagem dos agentes de mercado do simulador MANREM, potencializando a adaptação das ofertas de compra/venda de energia em função de objetivos individuais do agente;
- Melhorar o módulo de simulação de mercados em bolsa permitindo a adaptação de ofertas, por parte dos agentes com capacidades de aprendizagem, em função de sucesso de ofertas anteriores;

- Integrar os módulos de mercado em bolsa e contratação bilateral permitindo aos agentes participantes a celebração de contratos bilaterais e a licitação dos restantes volumes de energia em mercado bolsista;
- Recriar e analisar o impacto de elevadas penetrações de energia eólica no mercado intradiário, com base no cálculo de previsões eólicas adaptadas à sessão de mercado em estudo. As previsões a curto prazo, calculadas ao longo do dia em função das sessões de mercado intradiário, poderão contribuir para a redução da característica volatilidade de preços;
- Recriar e estudar o impacto de altas penetrações de geração variável em mercado em bolsa com base em ofertas que contabilizem o custo normalizado de energia (LCOE) associado às diversas tecnologias de geração consideradas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] J. a. P. T. Saraiva, J. L. P. Pereira da Silva e M. T. Ponce de Leão, *Mercados de Electricidade-Regulação e Tarificação de Uso das Redes*. FEUP Edições, 2002.
- [2] P. Europeu e C. U. a. Europeia, “Directiva 2003/54/ce de 26 de junho de 2003”, *Jornal Oficial da União Europeia*, 2003.
- [3] P. E. E. D. Conselho, “Diretiva 2012/27/ue”, *Jornal Oficial da União Europeia*, pp. 1–56, 2012.
- [4] E. Oliveira, K Fischer e O. Stepankova, “Multi-agent systems: which research for which applications”, *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 91–106, 1999.
- [5] F. Lopes, N. Mamede, A. Q. Novais e H. Coelho, “A negotiation model for autonomous computational agents: formal description and empirical evaluation”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 12, nº 3, pp. 195–212, 2002.
- [6] F. Lopes e H. Coelho, “Strategic and tactical behaviour in automated negotiation”, *International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 4, nº S10, pp. 35–63, 2010.
- [7] F. Sousa, F. Lopes e J. Santana, “Multi-agent electricity markets: a case study on contracts for difference”, *26th Database and Expert Systems Applications (DEXA 2015)*, *IEEE Press*, pp. 86–90, 2015.
- [8] H. Algarvio, F. Lopes e J. Santana, “Multi-agent retail energy markets: bilateral contracting and coalitions of end-use customers”, *European Energy Market (EEM 2015)*, *IEEE Press*, pp. 1–5, 2015.
- [9] F. Lopes, H. Algarvio, C. Ilco e J. Sousa, “Agent-based simulation of retail electricity markets: bilateral contracting with demand response”, *24th Database and Expert Systems Applications (DEXA 2013)*, *IEEE Press*, pp. 194–198, 2013.

- [10] F. Lopes, C. Ilco e J. Sousa, “Bilateral negotiation in energy markets: strategies for promoting demand response”, *International Conference on the European Energy Market, (EEM 2013)*, IEEE Press, pp. 1–6, 2013.
- [11] H. Li e L. Tesfatsion, “Development of open source software for power market research: the ames test bed”, *Journal of Energy Markets*, vol. 2, nº 2, pp. 111–128, 2009.
- [12] D. Vidigal, F. Lopes, A. Pronto e J. Santana, “Agent-based simulation of wholesale energy markets : a case study on renewable generation”, *26th Database and Expert Systems Applications (DEXA 2015)*, pp. 81–85, 2015.
- [13] E. Ela, M. Milligan, A. Bloom, A. Botterud, A. Townsend e T. Levin, “Evolution of wholesale electricity market design with increasing levels of renewable generation”, pp. 1–139, 2014.
- [14] J. Whelan, K. Msefer e C. V. Chung, *Economic supply & demand*. MIT, 2001.
- [15] J. Mata, *Economia da Empresa*, 8ª Edição. Fundação Calouste Gulbenkian, 2013.
- [16] D. S. Kirschen e G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [17] J. Sun e L. Tesfatsion, “Dc-opf formulation with price-sensitive demand bids”, rel. téc., 2008.
- [18] Operador do Mercado Ibérico de Energia (Pólo Espanhol), *Os nossos mercados de eletricidade*. endereço: <http://www.omie.es/pt/principal/mercados-e-produtos/mercado-da-electricidade/os-nossos-mercados-de-eletricidade> (acedido em 25/08/2015).
- [19] ERSE, *Mercado diário e intradiário*. endereço: <http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/mercadodeelectricidade/mercadodiario/Paginas/default.aspx> (acedido em 25/08/2015).
- [20] G Hamoud e I Bradley, “Assessment of transmission congestion cost and locational marginal pricing in a competitive electricity market”, *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 769–775, 2004.
- [21] M. R. Council, “Description of the operation of the mibel”, *Comisión del Mercado de Valores Mobiliarios, Entidad Reguladora de los Servicios Energéticos, Comisión Nacional del Mercado de Valores, Comisión Nacional de Energía*, 2009.
- [22] OMIE, *Resultados de mercado*, 2015. endereço: <http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf> (acedido em 25/08/2015).

- [23] C. Ilco, “Negociação bilateral em mercados de energia eléctrica multi-agente com participação activa dos consumidores”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.
- [24] J. F. S. Gaspar, “Estratégias de comercialização de energia para negociação bilateral em mercados de energia eléctrica multi-agente”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.
- [25] F. L. Bellifemine, G. Caire e D. Greenwood, *Developing Multi-Agent Systems with JADE (Wiley Series in Agent Technology)*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [26] N. Collier, “Repast: an extensible framework for agent simulation”, em *Http:repast.sourceforge.net*, 2003.
- [27] B. A. Crooks, “An introduction to the repast software: recursive porous agent simulation toolkit”, 2006.
- [28] D. B. Moran, A. J. Cheyer, L. E. Julia, D. L. Martin e S. Park, “Multimodal user interfaces in the open agent architecture”, *Proceedings of the 2nd international conference on Intelligent user interfaces*, pp. 61–68, 1997.
- [29] J. Sun e L. Tesfatsion, “Dynamic testing of wholesale power market designs: an open-source agent-based framework”, *Computational Economics*, vol. 30, nº 3, pp. 291–327, 2007.
- [30] H. Li e L. Tesfatsion, “The ames wholesale power market test bed: a computational laboratory for research, teaching, and training”, *Power & Energy Society General Meeting, PES’09, IEEE*, pp. 1–8, 2009.
- [31] L. Tesfatsion, “Determination of dc - opf dispatch & lmp solutions in the ames testbed”, em *Http://www2.econ.iastate.edu*, 2010.
- [32] Z. Zhou, W. K. V. Chan e J. H. Chow, “Agent-based simulation of electricity markets: a survey of tools”, *Artificial Intelligence Review*, vol. 28, nº 4, pp. 305–342, 2007.
- [33] P. A. S. Marques, “Simulador multi-agente para o mercado eléctrico”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2008.
- [34] L. A. B. Ramos, “A gestão do risco associado à negociação de energia eléctrica através de contratos bilaterais e mercado spot”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.
- [35] B. R. R. Pereira, “Contratos bilaterais em mercados multi-agente de energia eléctrica : protocolo de ofertas alternadas”, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.

- [36] I. Praça, C. Ramos, Z. Vale e M. Cordeiro, “Massem: a multiagent system that simulates competitive electricity markets”, *Intelligent Systems, IEEE*, vol. 18, nº 6, pp. 54–60, 2003.
- [37] G. Santos, T. Pinto, Z. Vale, I. Praca e H. Morais, “Virtual power players internal negotiation and management in massem”, 2013.
- [38] G. Grozev, D. Batten, M. Anderson, G. Lewis, J. Mo e J. Katzfey, “Nemsim: agent-based simulator for australia’s national electricity market”, em *Sim-TecT 2005 Conference Proceedings, Sydney, Australia*, 2005.
- [39] M. Amin, “Restructuring the electric enterprise”, em *Electricity Pricing in Transition*, Springer, 2002, cap. 3, pp. 27–50.
- [40] J. Sun e L. Tesfatsion, “Open-source software for power industry research, teaching, and training: a dc-opf illustration”, *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, pp. 1–6, 2007.
- [41] “Estrutura tarifária do setor elétrico em 2015”, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, rel. téc., 2015.
- [42] “Ren – energia eólica em portugal”, rel. téc., 2014.
- [43] *Serviço de informação de mercados de energia*, 2015. endereço: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoExploracao/Paginas/DiagramaDeProduçãoEólica.aspx> (acedido em 25/08/2015).
- [44] “Determinação do custo marginal de referência para centrais de ciclo combinado a gás natural”, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos, rel. téc., 2015. endereço: [http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/mercadodeelectricidade/sistema/Documents/NT\\\_Custo\\\_marginal\\\_CCGT\\\_Despacho\\\_4694\\\_2014.pdf](http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/mercadodeelectricidade/sistema/Documents/NT\_Custo\_marginal\_CCGT\_Despacho\_4694\_2014.pdf).
- [45] F. Sensfuß, M. Ragwitz e M. Genoese, “The merit-order effect: a detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in germany”, *Energy Policy*, vol. 36, nº 8, pp. 3086–3094, 2008.

A P Ê N D I C E



**CASO DE ESTUDO: CENÁRIOS I E II**  
**AGENTES PRODUTORES**

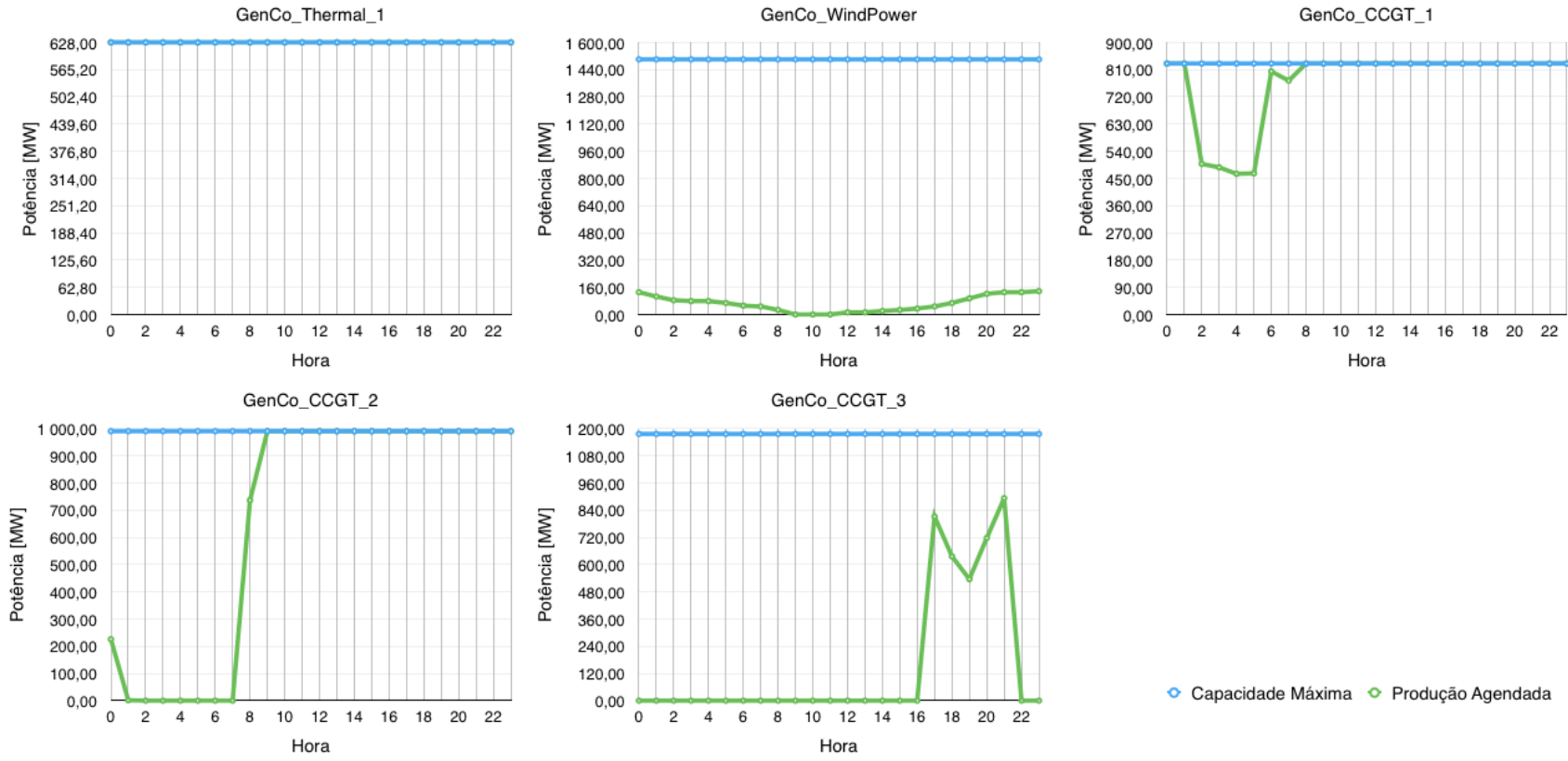


Figura A.1: Diagrama de Produção (Eólica Baixa)- Variação entre Potência Instalada e Produzida

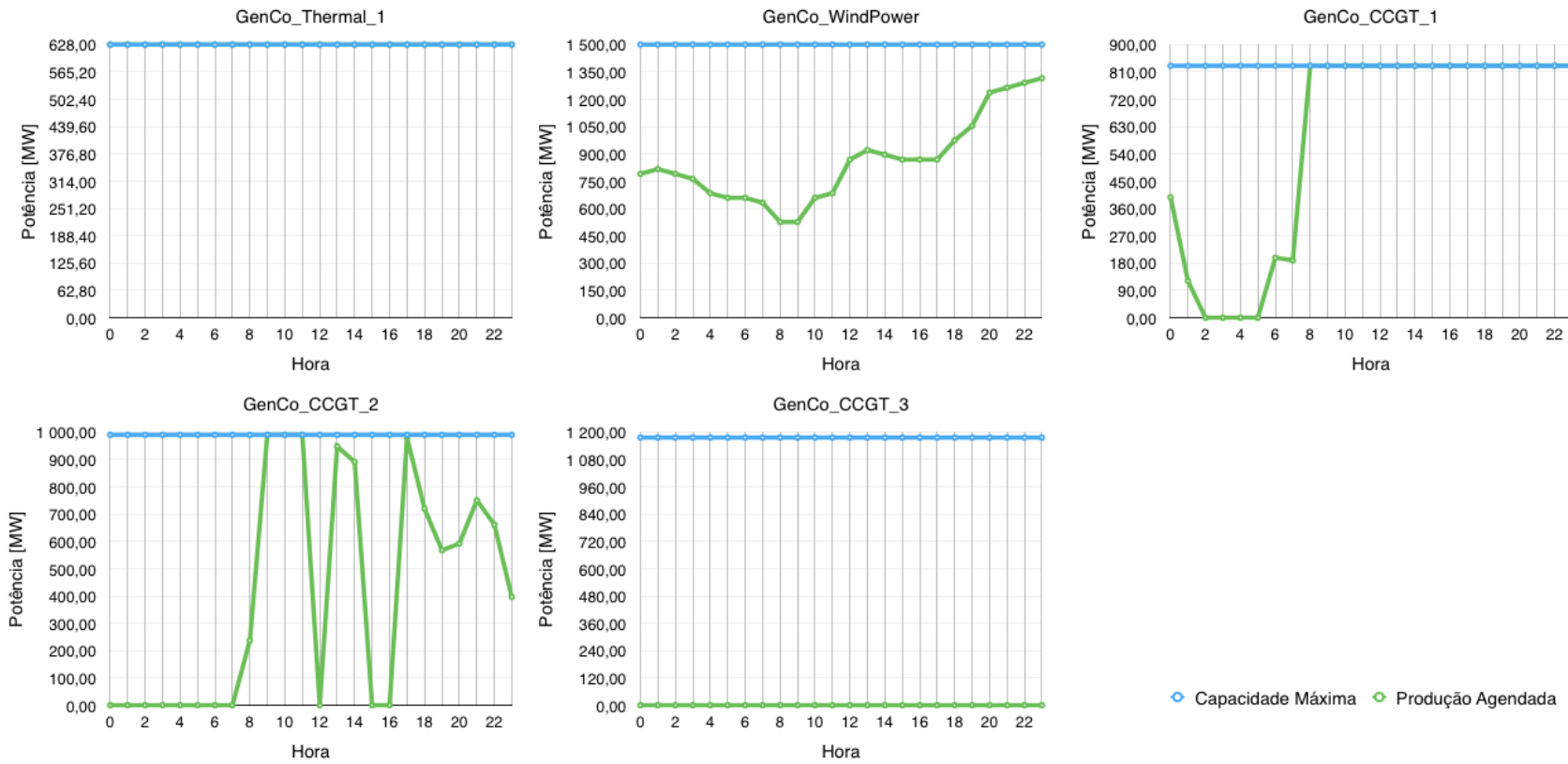


Figura A.2: Diagrama de Produção (Eólica Alta)- Variação entre Potência Instalada e Produzida

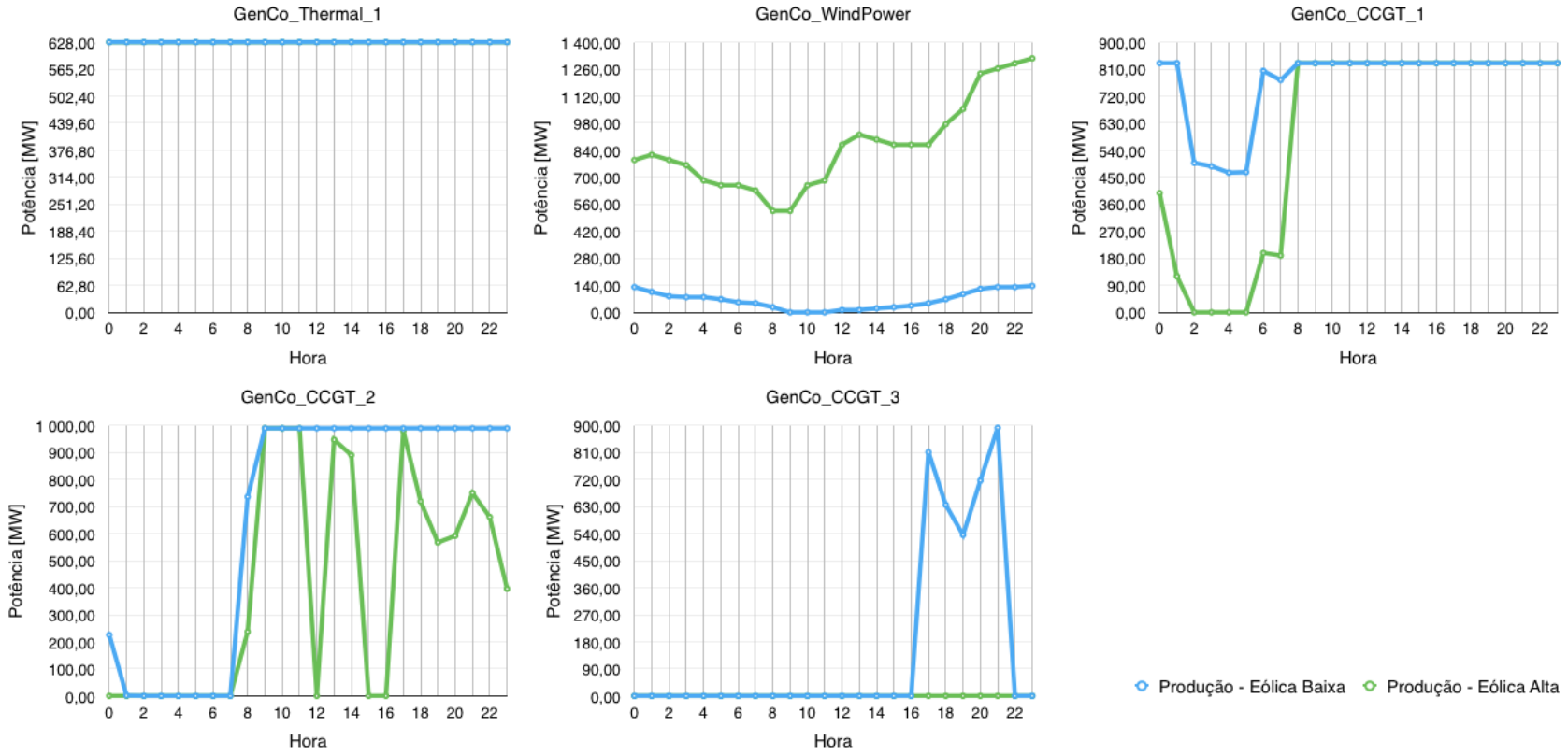


Figura A.3: Impacto da Geração Eólica no Diagrama de Produção

APÊNDICE



**CASO DE ESTUDO: CENÁRIOS III E IV**  
**AGENTES PRODUTORES**

Tabela B.1: *Generators* - Compromisso de Geração e Preço de Licitação para Cenário III

Hora	GenCo_Thermal_1		GenCo_WindPower		GenCo_CCGT_1		GenCo_CCGT_2		GenCo_CCGT_3	
	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)
00	628.00	47.15	131.05	0.00	492.77	55.61	480.73	56.17	452.88	56.79
01	628.00	47.15	105.79	0.00	427.43	55.15	404.51	55.72	361.41	56.34
02	628.00	47.15	83.68	0.00	303.45	54.28	259.86	54.85	187.84	55.47
03	628.00	47.15	78.95	0.00	306.38	54.30	263.28	54.87	191.94	55.49
04	628.00	47.15	78.95	0.00	300.05	54.26	255.89	54.83	183.07	55.45
05	628.00	47.15	67.89	0.00	299.76	54.26	255.55	54.82	182.66	55.44
06	628.00	47.15	52.11	0.00	427.00	55.15	404.00	55.71	360.81	56.33
07	628.00	47.15	47.37	0.00	426.49	55.15	403.41	55.71	360.09	56.33
08	628.00	47.15	26.84	0.00	534.43	55.90	529.33	56.47	511.20	57.09
09	628.00	47.15	0.00	0.00	649.58	56.71	663.68	57.27	672.42	57.89
10	628.00	47.15	0.00	0.00	699.45	57.06	721.86	57.62	742.23	58.24
11	628.00	47.15	0.00	0.00	716.22	57.17	741.42	57.74	765.71	58.36
12	628.00	47.15	12.63	0.00	729.01	57.26	756.34	57.83	783.61	58.45
13	628.00	47.15	12.63	0.00	699.03	57.05	721.37	57.62	741.64	58.24
14	628.00	47.15	20.53	0.00	684.61	56.95	704.55	57.52	721.46	58.14
15	628.00	47.15	26.84	0.00	709.63	57.13	733.73	57.69	756.48	58.31
16	628.00	47.15	34.74	0.00	703.15	57.08	726.18	57.65	747.41	58.27
17	628.00	47.15	47.37	0.00	723.07	57.22	749.42	57.79	775.30	58.41
18	628.00	47.15	67.89	0.00	696.25	57.03	718.12	57.60	737.75	58.22
19	628.00	47.15	94.74	0.00	681.82	56.93	701.29	57.50	717.55	58.12
20	628.00	47.15	121.58	0.00	700.83	57.07	723.47	57.63	744.16	58.25
21	628.00	47.15	131.05	0.00	730.11	57.27	757.63	57.84	785.16	58.46
22	628.00	47.15	131.05	0.00	688.45	56.98	709.02	57.54	726.83	58.16
23	628.00	47.15	137.37	0.00	649.02	56.70	663.02	57.27	671.63	57.89

Tabela B.2: *Generators* - Compromisso de Geração e Preço de Licitação para Cenário IV

Hora	GenCo_Thermal_1		GenCo_WindPower		GenCo_CCGT_1		GenCo_CCGT_2		GenCo_CCGT_3	
	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)
00	628.00	47.15	789.47	0.00	361.26	54.69	327.30	55.25	268.76	55.87
01	628.00	47.15	816.32	0.00	302.10	54.27	258.29	54.84	185.95	55.46
02	628.00	47.15	789.47	0.00	164.21	53.31	97.41	53.87	0.00	54.53
03	628.00	47.15	762.63	0.00	173.02	53.37	107.69	53.94	5.23	54.56
04	628.00	47.15	683.68	0.00	181.32	53.43	117.37	53.99	16.85	54.61
05	628.00	47.15	658.42	0.00	183.64	53.45	120.08	54.01	20.10	54.63
06	628.00	47.15	658.42	0.00	318.14	54.39	276.99	54.95	208.39	55.57
07	628.00	47.15	631.58	0.00	321.21	54.41	280.58	54.97	212.70	55.59
08	628.00	47.15	525.79	0.00	456.06	55.35	437.90	55.92	401.48	56.54
09	628.00	47.15	525.79	0.00	552.64	56.03	550.58	56.59	536.70	57.21
10	628.00	47.15	658.42	0.00	570.71	56.15	571.66	56.72	561.99	57.34
11	628.00	47.15	683.68	0.00	579.82	56.22	582.29	56.78	574.75	57.40
12	628.00	47.15	868.42	0.00	562.77	56.10	562.39	56.66	550.87	57.28
13	628.00	47.15	920.53	0.00	531.19	55.88	525.56	56.44	506.67	57.06
14	628.00	47.15	895.26	0.00	525.16	55.84	518.52	56.40	498.22	57.02
15	628.00	47.15	868.42	0.00	549.88	56.01	547.36	56.57	532.83	57.19
16	628.00	47.15	868.42	0.00	546.07	55.98	542.91	56.55	527.50	57.17
17	628.00	47.15	868.42	0.00	589.82	56.29	593.96	56.85	588.75	57.47
18	628.00	47.15	974.21	0.00	553.89	56.04	552.04	56.60	538.45	57.22
19	628.00	47.15	1053.16	0.00	531.29	55.88	525.67	56.44	506.80	57.06
20	628.00	47.15	1236.32	0.00	525.74	55.84	519.19	56.41	499.03	57.03
21	628.00	47.15	1263.16	0.00	546.46	55.99	543.37	56.55	528.04	57.17
22	628.00	47.15	1290.00	0.00	483.51	55.54	469.93	56.11	439.91	56.73
23	628.00	47.15	1315.26	0.00	449.78	55.31	430.57	55.87	392.69	56.49

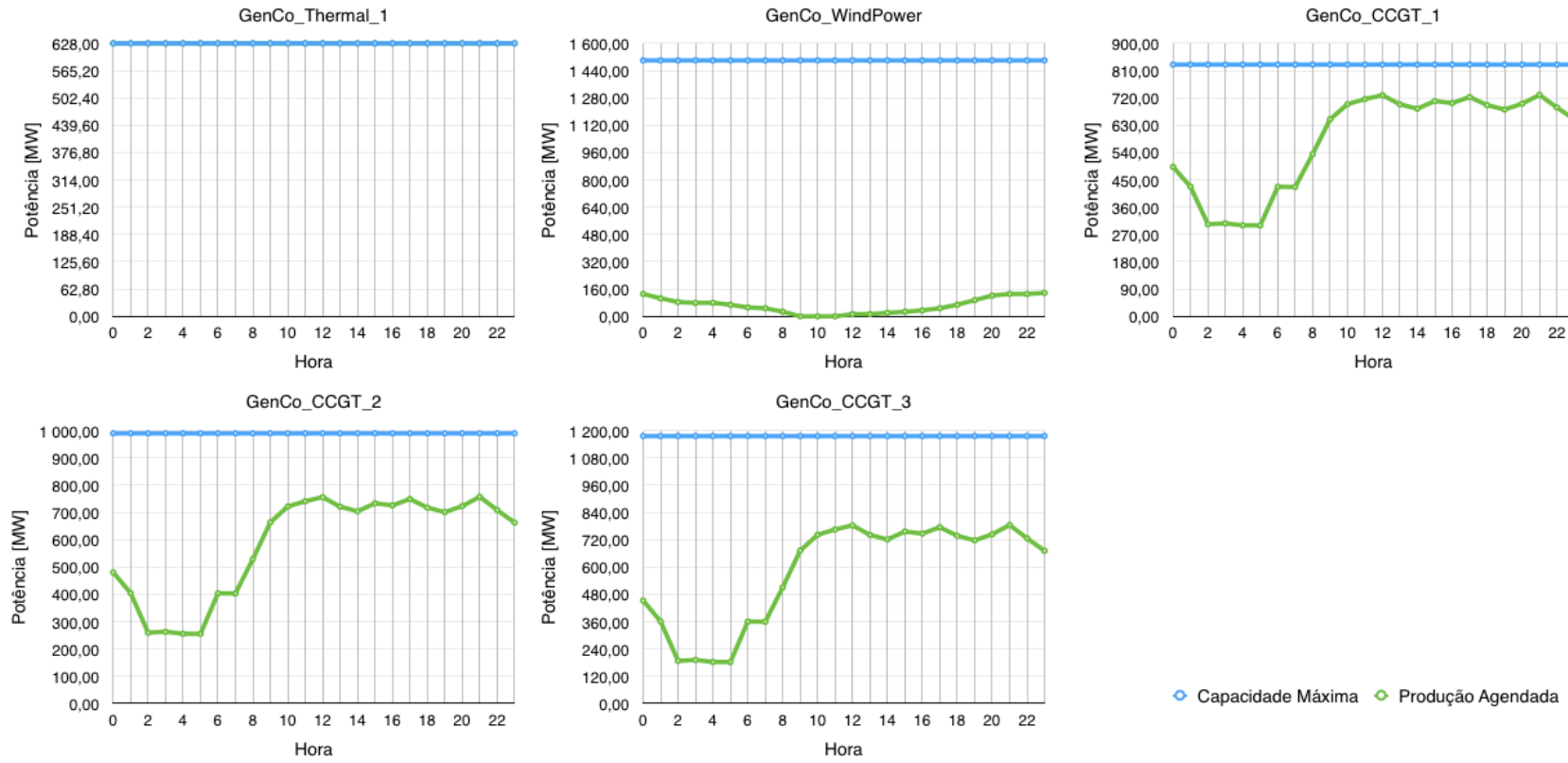


Figura B.1: Diagrama de Produção (Cenário III)- Variação entre Potência Instalada e Produzida

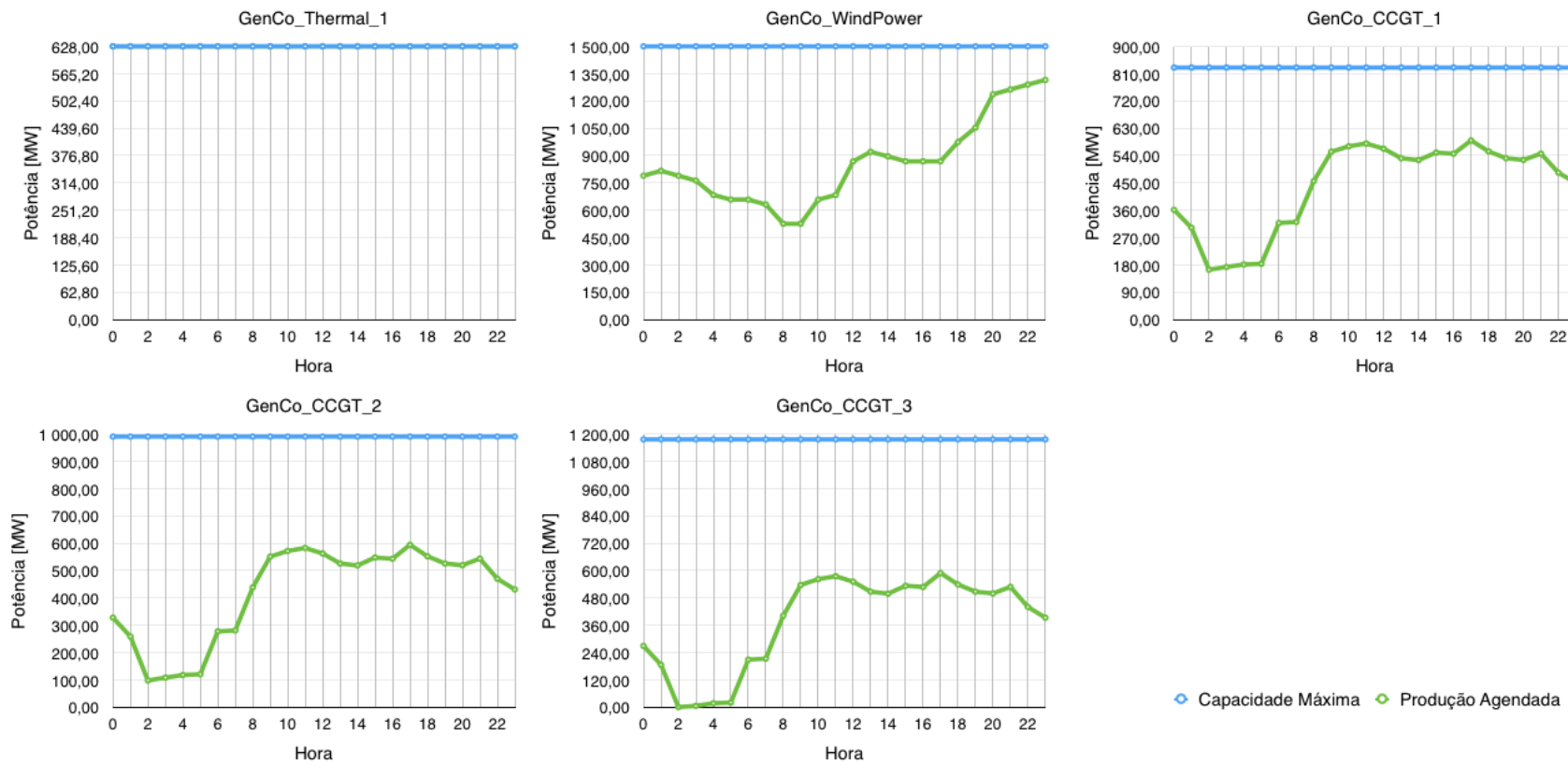


Figura B.2: Diagrama de Produção (Cenário IV)- Variação entre Potência Instalada e Produzida

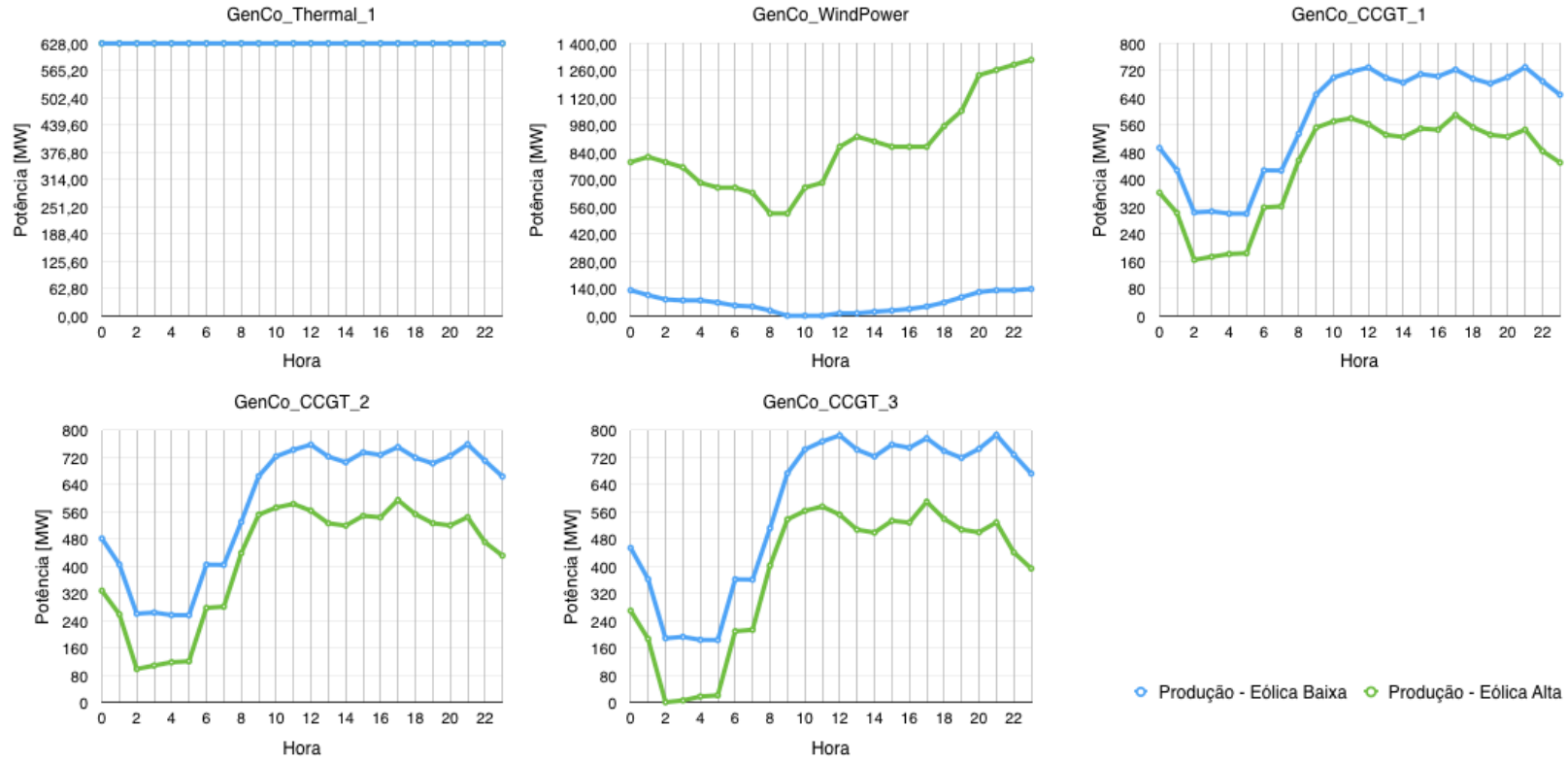


Figura B.3: Impacto da Geração Eólica no Diagrama de Produção (Cenário III e Cenário IV)

APÊNDICE



**CASO DE ESTUDO: CENÁRIOS I E II**  
**AGENTES RETALHISTAS**

Tabela C.1: *Retailers* - Preço e Procura para o mercado diário

Hora	Best Energy		SCO Corporation		Electro Center		First Energy	
	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)	Preço (€/MWh)	Potência (MW)
00	57.27	382.81	61.27	1159.35	62.27	272.45	53.27	758.01
01	57.27	332.11	61.27	1024.68	62.27	208.45	53.27	562.57
02	51.60	300.91	55.60	1007.40	56.60	202.18	47.60	551.89
03	51.60	291.93	55.60	991.21	56.60	202.18	47.60	591.08
04	51.60	298.98	55.60	980.46	56.60	191.73	47.60	560.29
05	51.60	296.81	55.60	972.88	56.60	189.73	47.60	554.15
06	57.27	302.72	61.27	984.92	62.27	196.36	53.27	574.46
07	57.27	309.85	61.27	910.16	62.27	228.64	53.27	571.74
08	60.34	362.94	64.34	1017.05	65.34	225.45	56.34	615.87
09	60.34	453.49	64.34	1330.23	65.34	321.91	56.34	911.45
10	60.34	490.06	64.34	1331.95	65.34	386.36	56.34	1107.26
11	60.34	499.40	64.34	1352.19	65.34	404.64	56.34	1162.74
12	60.34	510.67	64.34	1376.06	65.34	419.64	56.34	1208.52
13	60.34	494.93	64.34	1315.65	65.34	391.73	56.34	1123.77
14	60.34	482.28	64.34	1288.98	65.34	381.27	56.34	1091.53
15	60.34	493.26	64.34	1347.73	65.34	405.18	56.34	1163.92
16	60.34	472.97	64.34	1344.56	65.34	403.18	56.34	1156.42
17	62.01	461.02	66.01	1330.29	67.01	392.45	58.01	1123.39
18	62.01	447.37	66.01	1285.24	67.01	368.55	58.01	1050.79
19	62.01	468.28	66.01	1279.90	67.01	345.91	58.01	984.43
20	62.01	530.07	66.01	1406.47	67.01	349.73	58.01	1000.17
21	62.01	529.46	66.01	1396.82	67.01	398.55	58.01	1146.59
22	60.34	498.88	64.34	1345.13	65.34	404.18	56.34	1161.34
23	60.34	477.03	64.34	1272.11	65.34	368.27	56.34	1052.17

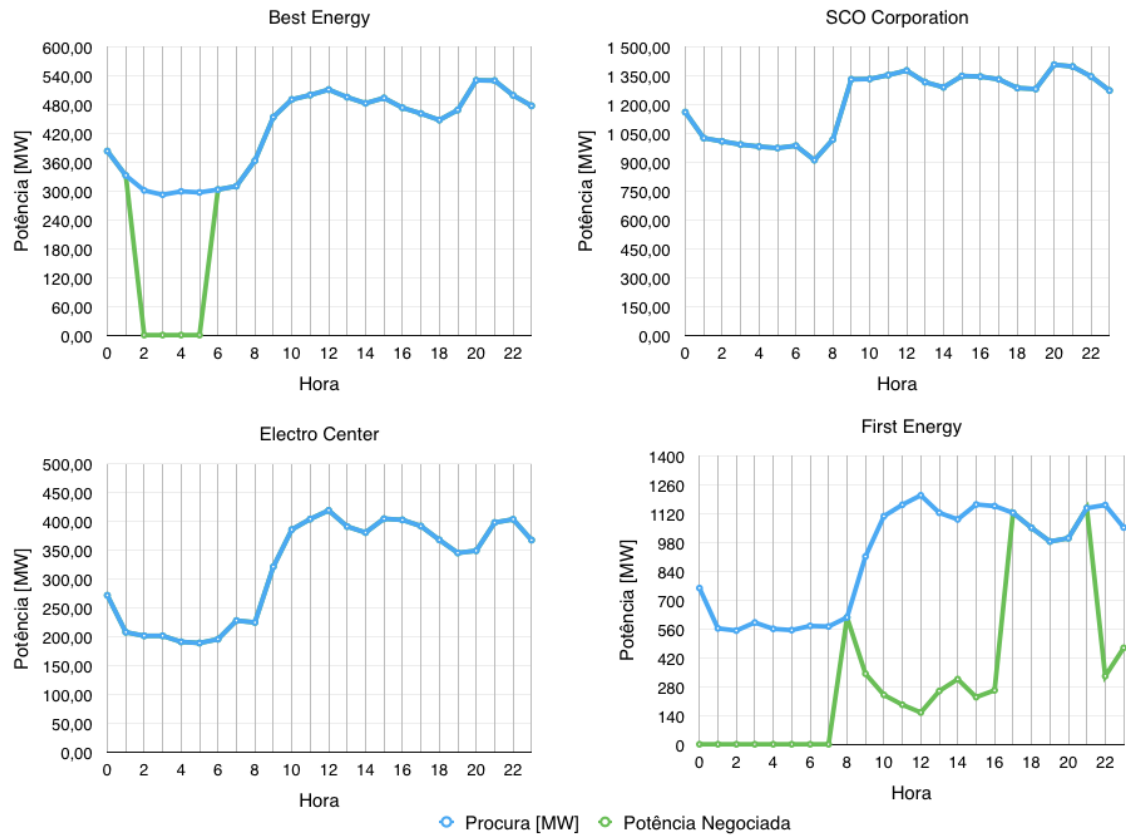


Figura C.1: Diagrama de Carga (Eólica Baixa)- Variação entre Potência Procurada e Adquirida

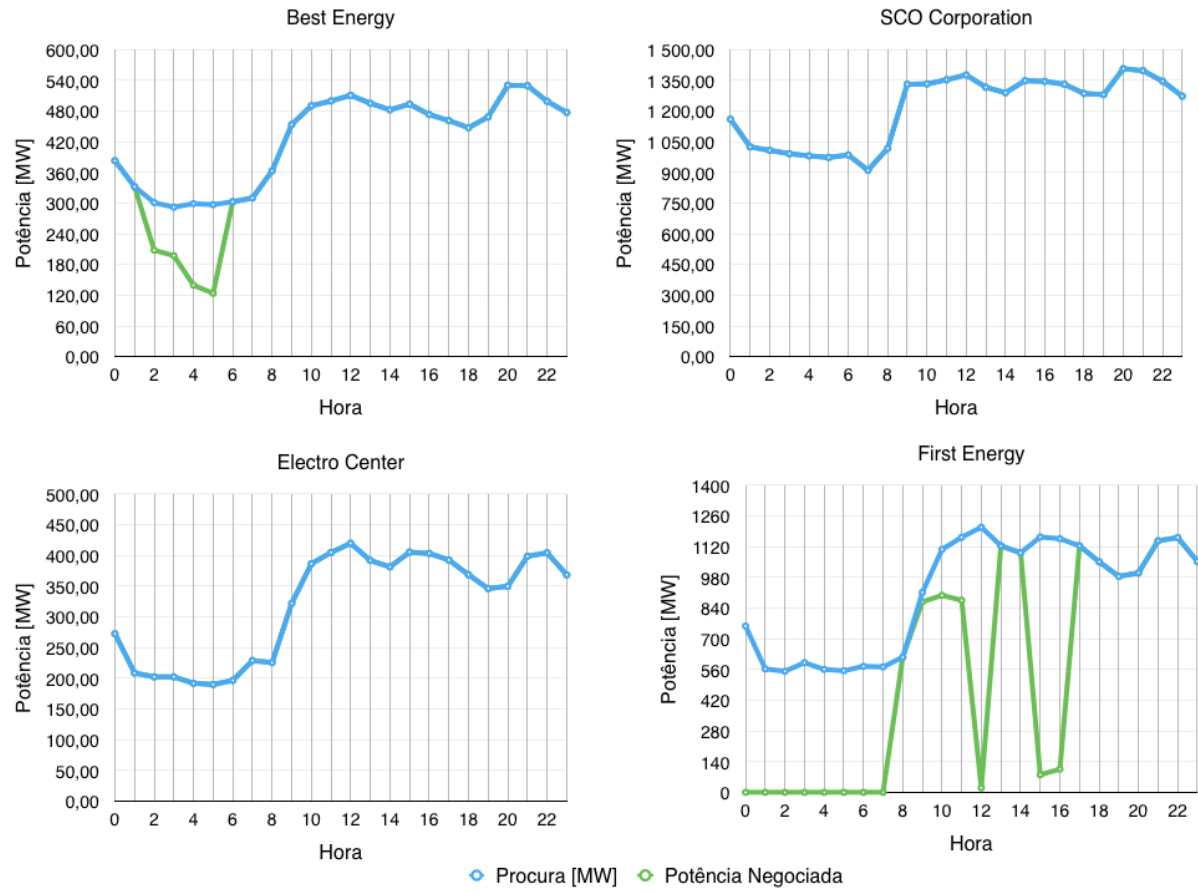


Figura C.2: Diagrama de Carga (Eólica Alta)- Variação entre Potência Procurada e Adquirida

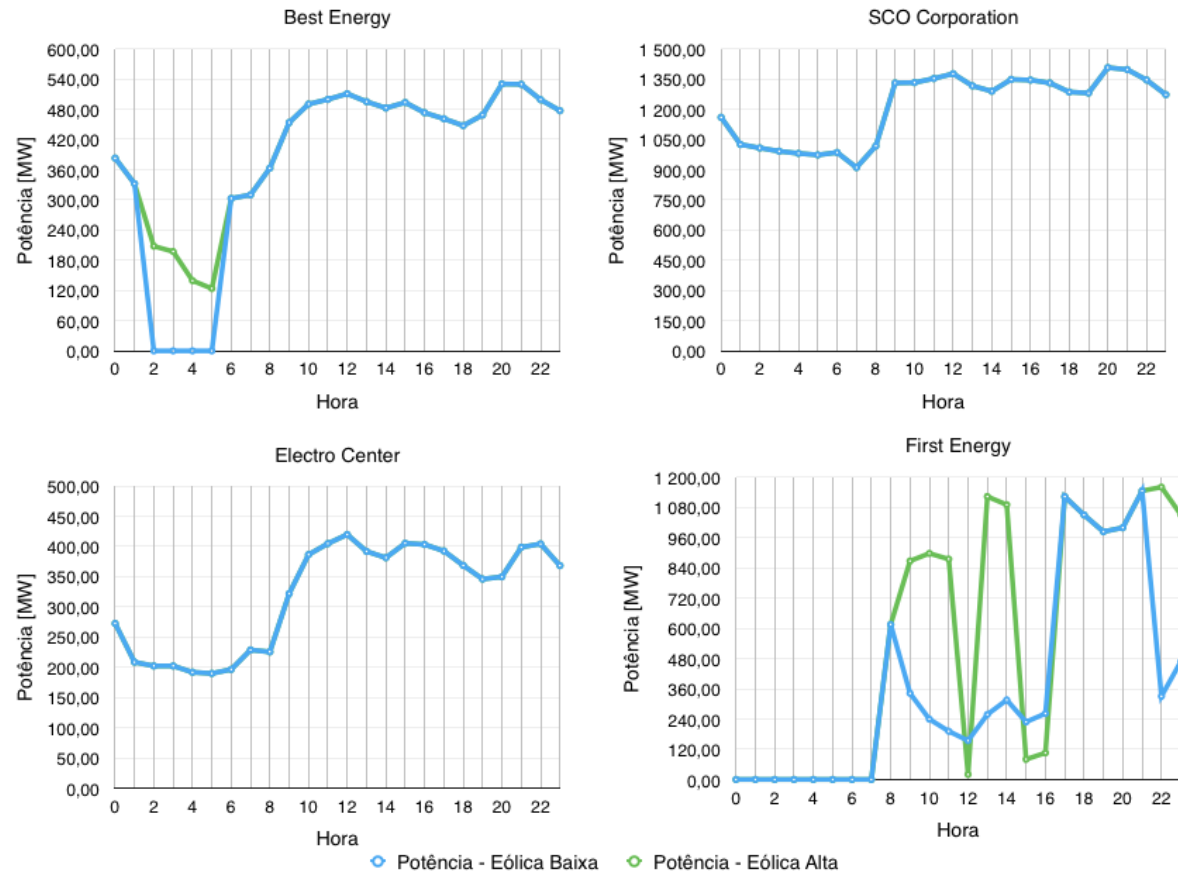


Figura C.3: Impacto da Geração Eólica no Diagrama de Carga



APÊNDICE



**CASO DE ESTUDO: CENÁRIOS III E IV**  
**AGENTES RETALHISTAS**

Tabela D.1: *Retailers* - Procura Fixa e Procura Máxima para o mercado diário

Hora	Best Energy		SCO Corporation		Electro Center		First Energy	
	Proc. Fixa (MW)	Proc. Máx. (MW)	Proc. Fixa (MW)	Proc. Máx. (MW)	Proc. Fixa (MW)	Proc. Máx. (MW)	Proc. Fixa (MW)	Proc. Máx. (MW)
00	267.97	497.65	811.55	1507.16	190.72	354.19	530.61	985.41
01	232.48	431.74	717.28	1332.08	145.92	270.99	393.80	731.34
02	210.64	391.18	705.18	1309.62	141.53	262.83	386.32	717.46
03	204.35	379.51	693.85	1288.57	141.53	262.83	413.76	768.40
04	209.29	388.67	686.32	1274.60	134.21	249.25	392.20	728.38
05	207.77	385.85	681.02	1264.74	132.81	246.65	387.91	720.40
06	211.90	393.54	689.44	1280.40	137.45	255.27	402.12	746.80
07	216.90	402.81	637.11	1183.21	160.05	297.23	400.22	743.26
08	254.06	471.82	711.94	1322.17	157.82	293.09	431.11	800.63
09	317.44	589.54	931.16	1729.30	225.34	418.48	638.02	1184.89
10	343.04	637.08	932.37	1731.54	270.45	502.27	775.08	1439.44
11	349.58	649.22	946.53	1757.85	283.25	526.03	813.92	1511.56
12	357.47	663.87	963.24	1788.88	293.75	545.53	845.96	1571.08
13	346.45	643.41	920.96	1710.35	274.21	509.25	786.64	1460.90
14	337.60	626.96	902.29	1675.67	266.89	495.65	764.07	1418.99
15	345.28	641.24	943.41	1752.05	283.63	526.73	814.74	1513.10
16	331.08	614.86	941.19	1747.93	282.23	524.13	809.49	1503.35
17	322.71	599.33	931.20	1729.38	274.72	510.19	786.37	1460.41
18	313.16	581.58	899.67	1670.81	257.99	479.12	735.55	1366.03
19	327.80	608.76	895.93	1663.87	242.14	449.68	689.10	1279.76
20	371.05	689.09	984.53	1828.41	244.81	454.65	700.12	1300.22
21	370.62	688.30	977.77	1815.87	278.99	518.12	802.61	1490.57
22	349.22	648.54	941.59	1748.67	282.93	525.43	812.94	1509.74
23	333.92	620.14	890.48	1653.74	257.79	478.75	736.52	1367.82

Tabela D.2: *Retailers* - Procura sensível ao preço e procura total adquirida em mercado para Cenário III

Hora	Best Energy		SCO Corporation		Electro Center		First Energy	
	Proc. Sensível (MW)	Proc. Total (MW)	Proc. Sensível (MW)	Proc. Total (MW)	Proc. Sensível (MW)	Proc. Total (MW)	Proc. Sensível (MW)	Proc. Total (MW)
00	0.00	267.97	221.12	1032.67	163.47	354.19	0.00	530.61
01	0.00	232.48	312.59	1029.87	125.07	270.99	0.00	393.80
02	0.00	210.64	0.00	705.18	19.16	160.69	0.00	386.32
03	0.00	204.35	0.00	693.85	15.06	156.59	0.00	413.76
04	0.00	209.29	0.00	686.32	23.93	158.14	0.00	392.20
05	0.00	207.77	0.00	681.02	24.34	157.15	0.00	387.91
06	0.00	211.90	313.19	1002.63	117.82	255.27	0.00	402.12
07	0.00	216.90	313.91	951.02	137.18	297.23	0.00	400.22
08	69.80	323.86	469.80	1181.74	135.27	293.09	0.00	431.11
09	0.00	317.44	308.58	1239.74	193.14	418.48	0.00	638.02
10	0.00	343.04	238.77	1171.14	231.82	502.27	0.00	775.08
11	0.00	349.58	215.29	1161.82	242.78	526.03	0.00	813.92
12	0.00	357.47	197.39	1160.63	251.78	545.53	0.00	845.96
13	0.00	346.45	239.36	1160.32	235.04	509.25	0.00	786.64
14	0.00	337.60	259.54	1161.83	228.76	495.65	0.00	764.07
15	0.00	345.28	224.52	1167.93	243.10	526.73	0.00	814.74
16	0.00	331.08	233.59	1174.78	241.90	524.13	0.00	809.49
17	0.00	322.71	372.70	1303.90	235.47	510.19	0.00	786.37
18	10.25	323.41	410.25	1309.92	221.13	479.12	0.00	735.55
19	30.45	358.25	430.45	1326.38	207.54	449.68	0.00	689.10
20	3.84	374.89	403.84	1388.37	209.84	454.65	0.00	700.12
21	0.00	370.62	362.84	1340.61	239.13	518.12	0.00	802.61
22	0.00	349.22	254.17	1195.76	242.50	525.43	0.00	812.94
23	0.00	333.92	309.37	1199.85	220.96	478.75	0.00	736.52

Tabela D.3: *Retailers* - Procura sensível ao preço e procura total adquirida em mercado para Cenário IV

Hora	Best Energy		SCO Corporation		Electro Center		First Energy	
	Proc. Sensível (MW)	Proc. Total (MW)	Proc. Sensível (MW)	Proc. Total (MW)	Proc. Sensível (MW)	Proc. Total (MW)	Proc. Sensível (MW)	Proc. Total (MW)
00	5.24	273.21	405.24	1216.79	163.47	354.19	0.00	530.61
01	88.05	320.53	488.05	1205.33	125.07	270.99	0.00	393.80
02	0.00	210.64	114.11	819.29	121.30	262.83	0.00	386.32
03	0.00	204.35	101.77	795.62	121.30	262.83	0.00	413.76
04	0.00	209.29	90.16	776.48	115.04	249.25	0.00	392.20
05	0.00	207.77	86.90	767.92	113.84	246.65	0.00	387.91
06	65.61	277.51	465.61	1155.05	117.82	255.27	0.00	402.12
07	61.30	278.20	461.30	1098.41	137.18	297.23	0.00	400.22
08	179.52	433.58	579.52	1291.46	135.27	293.09	0.00	431.11
09	44.30	361.74	444.30	1375.46	193.14	418.48	0.00	638.02
10	19.01	362.05	419.01	1351.38	231.82	502.27	0.00	775.08
11	6.2	355.83	406.25	1352.78	242.78	526.03	0.00	813.92
12	30.13	387.60	430.13	1393.37	251.78	545.53	0.00	845.96
13	74.33	420.78	474.33	1395.29	235.04	509.25	0.00	786.64
14	82.78	420.38	482.78	1385.07	228.76	495.65	0.00	764.07
15	48.17	393.45	448.17	1391.58	243.10	526.73	0.00	814.74
16	53.50	384.58	453.50	1394.70	241.90	524.13	0.00	809.49
17	159.25	481.96	559.25	1490.45	235.47	510.19	0.00	786.37
18	209.55	522.71	609.55	1509.22	221.13	479.12	0.00	735.55
19	241.20	569.00	641.20	1537.13	207.54	449.68	0.00	689.10
20	248.97	620.02	648.97	1633.50	209.84	454.65	0.00	700.12
21	219.96	590.58	619.96	1597.73	239.13	518.12	0.00	802.61
22	141.09	490.31	541.09	1482.68	242.50	525.43	0.00	812.94
23	188.31	522.23	588.31	1478.79	220.96	478.75	0.00	736.52

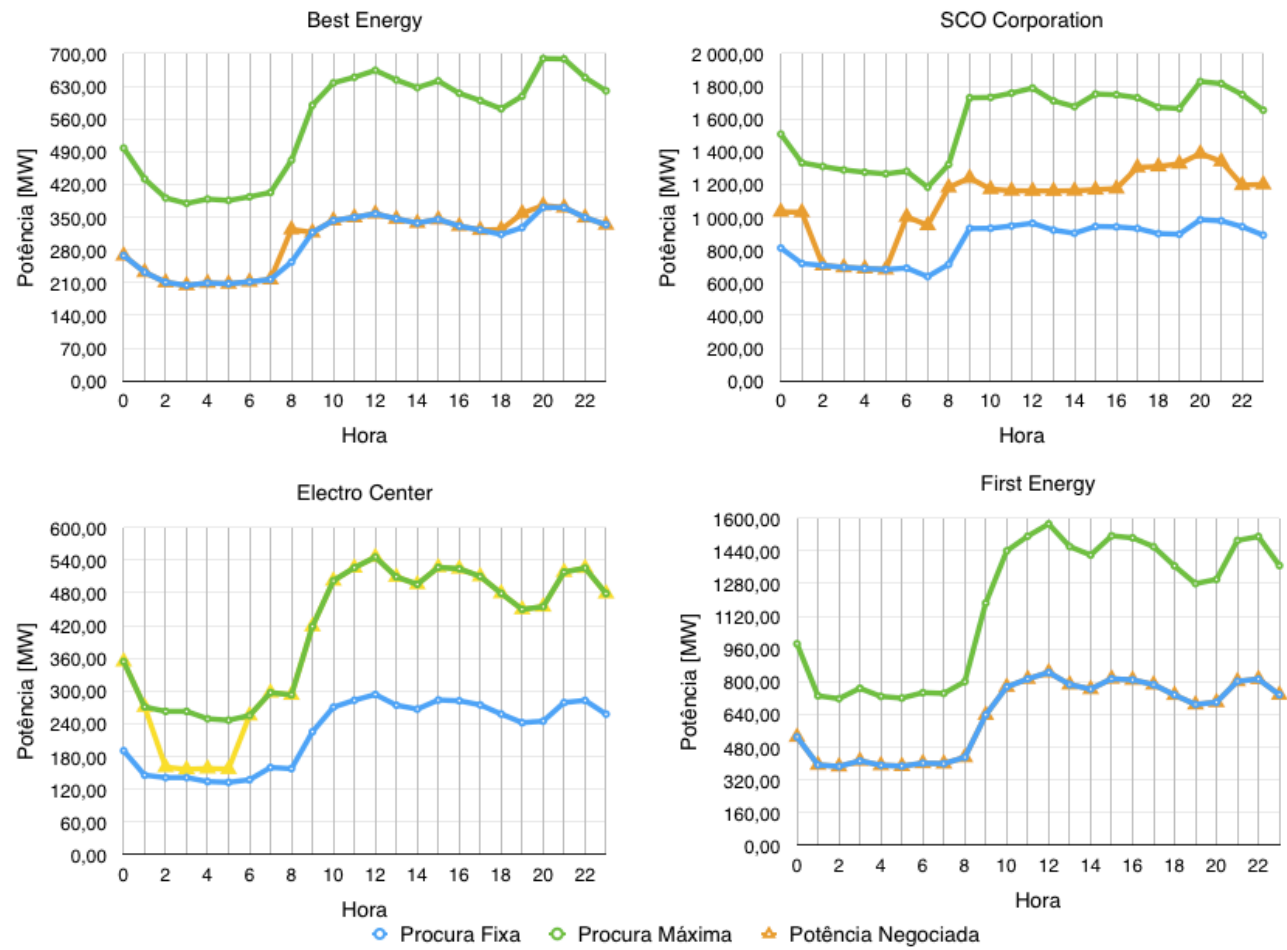


Figura D.1: Diagrama de Carga (Cenário III)- Variação entre Potência Procurada e Adquirida

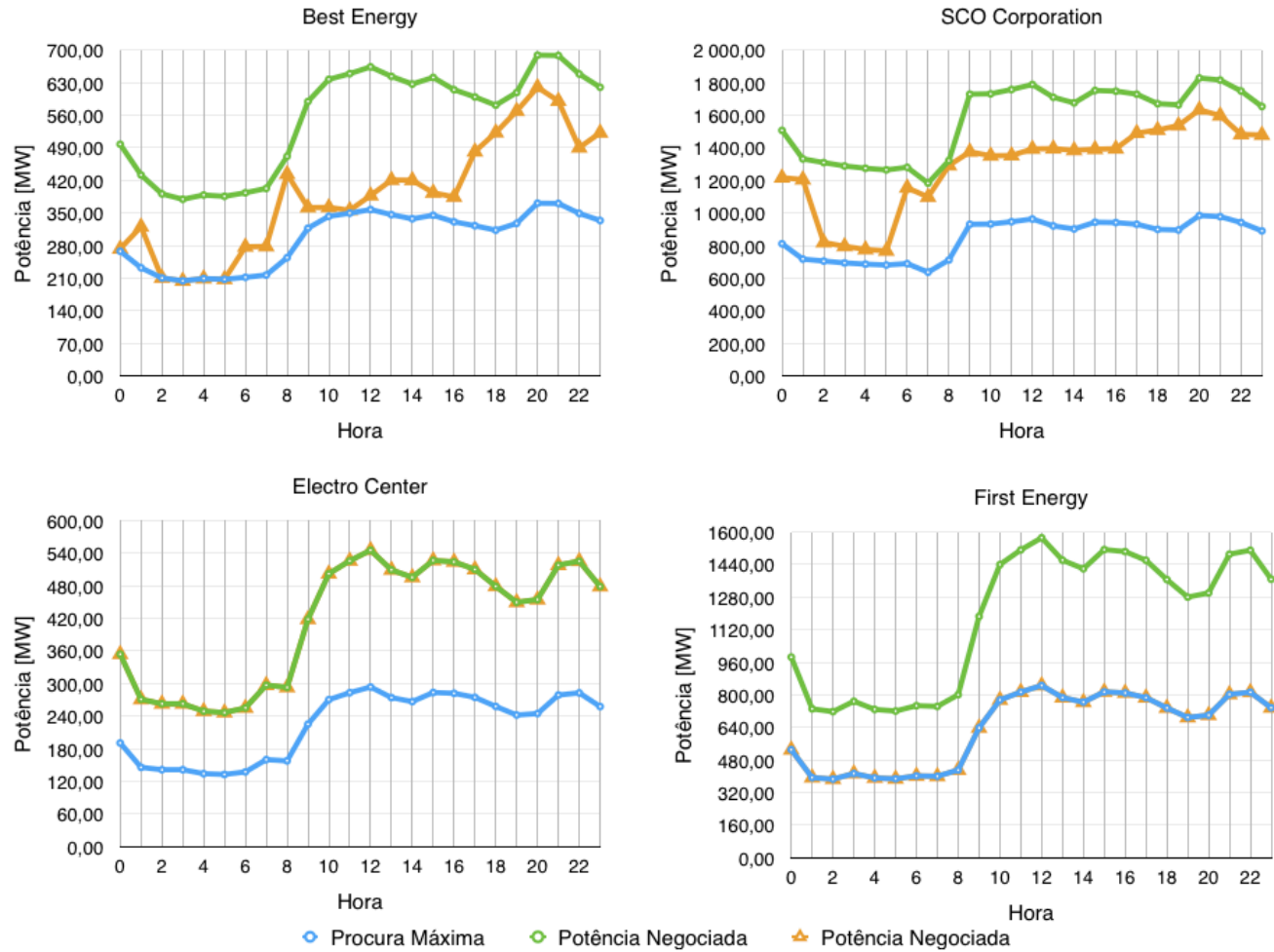


Figura D.2: Diagrama de Carga (Cenário IV)- Variação entre Potência Procurada e Adquirida

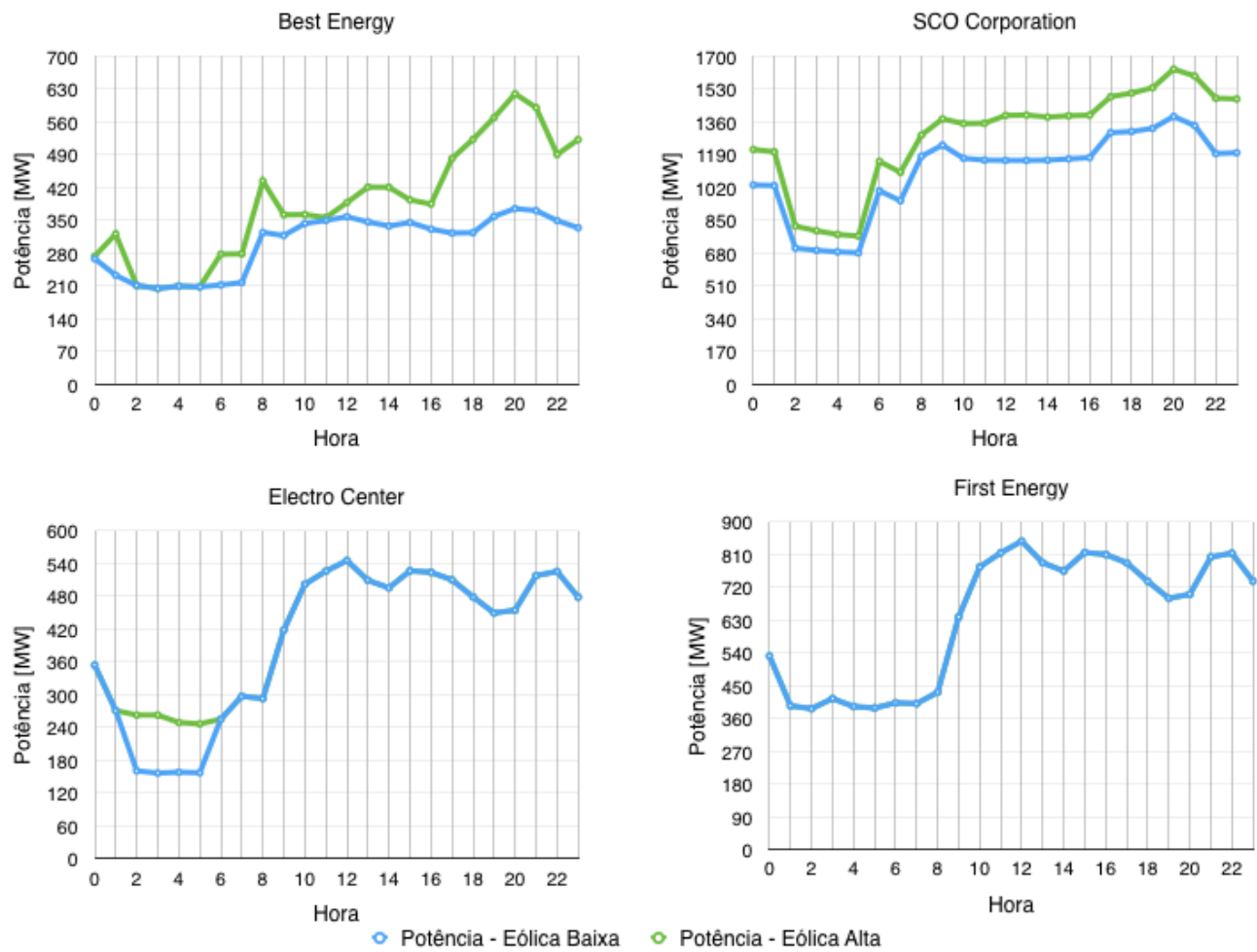


Figura D.3: Impacto da Geração Eólica no Diagrama de Carga (Cenário III e Cenário IV)





