



ISEL

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



Estratégias de Comercialização de Energia Elétrica em Mercados Liberalizados

EMANUEL CAMÕES FERNANDES

(Licenciado)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Professor Paulo Manuel Trigo Cândido da Silva

Júri:

Presidente: Professor José Manuel do Valle Cardoso Igreja

Vogais:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Professora Maria Joana Dantas Vaz Pais Ribeiro

Dezembro de 2014



ISEL

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



Estratégias de Comercialização de Energia Elétrica em Mercados Liberalizados

EMANUEL CAMÕES FERNANDES

(Licenciado)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – ramo de Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Professor Paulo Manuel Trigo Cândido da Silva

Júri:

Presidente: Professor José Manuel do Valle Cardoso Igreja

Vogais:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Professora Maria Joana Dantas Vaz Pais Ribeiro

Dezembro de 2014

I. RESUMO

O estudo do mercado elétrico liberalizado é essencial no desenvolvimento de estratégias de comercialização de energia, pois a análise das variáveis e respetiva evolução durante determinados períodos e cenários, permite delinear uma estratégia ótima que maximize lucro para a empresa geradora.

Esta dissertação tem como objetivo o estudo de diferentes estratégias de comercialização e o seu impacto no lucro obtido pelas empresas. São analisadas e implementadas 4 estratégias de comercialização distintas, duas estratégias com um grau de risco baixo, uma com um grau de risco intermédio e uma com elevado grau de risco.

A principal variável em estudo é o preço de oferta de uma empresa geradora, que será otimizado. Para tal vão existir três empresas, onde duas utilizarão a mesma estratégia e a terceira utilizará uma estratégia que poderá ser igual ou diferente das outras empresas. Também foram analisados os diferentes equilíbrios de Nash, para que se possa obter os diversos equilíbrios tendo em consideração as 4 estratégias utilizadas por cada uma das empresas.

Os resultados obtidos demonstram as vantagens e desvantagens de cada estratégia utilizada. As estratégias de comercialização de menor risco, tais como as de custos marginais e de *undercut*, são benéficas no mercado dominado por empresas que utilizam preços de oferta superiores às estratégias de menor risco desenvolvidas. Quanto maior for o preço de oferta das empresas rivais, maior será o lucro obtido pelas estratégias de custos marginais e *undercut* em comparação com as outras empresas existentes no mercado. As estratégias de maior risco, tais como de *bid-up* e custos médios, obtêm maior lucro quando as empresas rivais utilizam estratégias semelhantes, sendo que ao existir um preço de oferta elevado no mercado, todas as empresas beneficiam de um maior lucro.

Por último pode ser observado que os equilíbrios de Nash variam de ronda para ronda consoante as variáveis de mercado existentes numa determinada ronda, tais como os preços dos combustíveis, a potência vendida e o preço das matérias-primas. Ao analisar os diferentes equilíbrios de Nash pode obter-se o melhor cenário possível para cada ronda.

II. ABSTRACT

The study of the liberalized electricity market is essential in the development of trading strategies, because of the variables and their evolutions through certain periods allows the formulation of an optimal strategy that maximizes the profit for the generating company.

This dissertation has the objective of studying different trading strategies and their impact on the profit obtained by the generating companies. Four different trading strategies are analyzed and implemented, two of which have a low risk associated with them, one with an intermediate risk, and lastly one with a high risk.

The main variable that is studied is the price offer of a generating company, which is then optimized. To study the price offer, there are three generating companies, where two use the same strategy, whilst the third uses a strategy that is either similar or different from the strategies used by the other companies. The Nash equilibria were also analyzed for each round, considering the four strategies implemented by each company.

The obtained results show the advantages and disadvantages of each strategy used. The low risk trading strategies, such as the marginal costs and undercut, are beneficial in a market dominated by companies that use price offers superior to the low risk strategies. The bigger the price offer from rival companies, the bigger the profit obtained by the marginal costs and undercut strategies in comparison to the other companies in the market. The higher risk strategies such as the bid-up and medium costs strategies, obtain more profit when other companies use similar strategies. If the price offer from each company is high overall, all the companies obtain more profit.

Lastly, the Nash equilibria will also be analyzed. We can see that different Nash equilibria exist in different rounds, depending on the market variables, such as the fuel prices, the sold power and the price of natural resources. By analyzing the different Nash equilibria, the best scenario for each round can be obtained.

III. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os professores, amigos e familiares que me ajudaram na execução deste trabalho e que me ensinaram tudo o que aprendi até hoje.

Queria agradecer aos meus pais, Emanuel e Manuela, pelo empenho, dedicação e esforço realizado para que possa ter realizado esta dissertação, pela paciência, sabedoria e apoio que mostraram durante a realização da mesma.

Aos orientadores, professor Jorge de Sousa e professor Paulo Trigo, pela disponibilidade, incentivo e sabedoria demonstrada durante toda a execução desta dissertação, e por todo o esforço e empenho demonstrado desde a proposta do tema.

Gostaria de agradecer também á minha namorada Diana por todo o incentivo e determinação que me permitiram continuar focado e sempre determinado na realização da dissertação.

Por fim gostaria de agradecer a todos os meus colegas e amigos que sempre me apoiaram e me ajudaram a ultrapassar todas as dificuldades desde o primeiro dia.

IV. ACRÓNIMOS

MIBEL – Mercado Ibérico de Eletricidade

REN – Rede Elétrica Nacional

SEN – Sistema Elétrico Nacional

SEP – Sistema Elétrico de Serviço Público

SEI – Sistema Elétrico Independente

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

SIMER – Sistema de Informação de Mercados

OMIP – Operador de Mercado Ibérico de Energia, pólo Português

OMIE – *Operador del Mercado Ibérico de Energia, pólo Espanhol*

EDP – Energia de Portugal

OFGEM – *Office of Gas and electricity market*

EEX – *European Energy Exchange*

EPEX – *European Power Exchange*

RTE – *Réseau de transport d'électricité*

V. LISTA DE VARIÁVEIS

I – Investimento de cada tecnologia em M€

O_p – Períodos de operação em Anos

P_i – Potência de cada central em MW

P_t^{mat} – Preço do *fuel* em M€

η_i – Rendimento de cada central em %

SE – Emissões específicas do CO₂ em €/MWh

O_f – Oferta total do mercado no período t em MW

D – Procura total do mercado no período t em MW

q – quantidade de energia vendida em MW

π – Preço de oferta em €/MWh

i – Tecnologia

b – Número de blocos de potência

ε – factor de bid-up dependente da tecnologia e da ordem de mérito, em %/100

α – Fator de *undercut* em percentagem

$C_t^{\text{var}^u}$ - Custos marginais do utilizador em €/MWh

$C_t^{\text{var}^r}$ - Custos marginais do rival em €/MWh

Índice

Índice	1
Índice de Tabelas	2
Índice de Figuras.....	2
1. Introdução	7
1.1. Motivação	7
1.2. Objetivos.....	7
1.3. Descrição sumária.....	7
2. Estado da arte	11
2.1. Mercados elétricos	11
2.2. Variáveis do mercado elétrico	12
2.3. Características do mercado de elétrico	14
2.4. Mercados europeus	15
2.5. Mercado elétrico em Portugal.....	17
2.6. MIBEL.....	19
2.7. Análise estratégica do mercado	20
2.7.1 Estratégias de investimento.....	20
2.7.2 Estratégias de comercialização	21
2.8. Teoria de jogos	23
3. Modelo e estratégias.....	29
3.1. Simulador ITEM-Game	29
3.2. Programação Python.....	32
3.3. Interação entre Python e ITEM-Game.....	34
3.4. Estratégias desenvolvidas	35
3.4.1 Estratégia de investimento	35
3.4.2 Cálculos iniciais comuns às estratégias desenvolvidas.....	36
3.4.3 Estratégia de comercialização EC.1 – Custos Marginais.....	38
3.4.4 Estratégia de comercialização EC.2 – Custos Médios	39
3.4.5 Estratégia de comercialização EC.3 – Bid-Up.....	40
3.4.6 Estratégia de comercialização EC.4 – Undercut.....	42
4. Simulações e resultados	47
4.1. Análise Ma/Ma; Me/Me; B/B; U/U	48
4.2. Análise Ma/B.....	51
4.3. Análise Me/Ma	53

4.4. Análise B/Me.....	54
4.5. Análise U/B	57
4.6. Análise dos equilíbrios de Nash	59
4.7. Estudo estratégia EC.1.....	61
4.8. Estudo estratégia EC.2.....	63
4.9. Estudo estratégia EC.3.....	66
4.10. Estudo estratégia EC.4.....	70
5. Conclusões	75
6. Referências bibliográficas	79
7. Anexo I – Tutorial do processo de simulação	85

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Conceitos desenvolvidos no projeto.....	23
Tabela 2 – Matriz do dilema do prisioneiro.	25
Tabela 3 – Tecnologias/Centrais ITEM-Game.	29
Tabela 4 – Portfólio inicial de cada jogador.....	35
Tabela 5 – Ordem de Mérito E.I.2.	41
Tabela 6 – Valor Épsilon.....	42
Tabela 7 – Sigla utilizada para cada estratégia simulada.	47
Tabela 8 – Matriz de lucros obtidos pelos 3 jogadores. Equilíbrios de Nash referentes á 1ª ronda.	59
Tabela 9 – Matriz de lucros obtidos pelos 3 jogadores. Equilíbrios de Nash referentes á 5ª ronda.	60
Tabela 10 – Matriz de lucros obtidos pelos 3 jogadores. Equilíbrios de Nash referentes á 10ª ronda.....	60

Índice de Figuras

Figura 1 – Curvas de procura e de oferta para uma determinada hora. Fonte: NordPool [19]. ..	17
Figura 2 – Preços de oferta para o dia 22 de Setembro de 2011. Fonte: NordPool [19].	17
Figura 3 – Estrutura mercado elétrico português. Fonte: EDP [21].	18
Figura 4 – Informação relativa ao dia 4/4/2014 de mercado ibérico. Fonte: OMIE.	20

Figura 5 – Jogo sequencial ilustrativo da crise dos mísseis em Cuba, 1963 [35].	24
Figura 6 – Separador de investimento no simulador <i>ITEM-Game</i> .	30
Figura 7 – Separador de comercialização no simulador <i>ITEM-Game</i> .	31
Figura 8 – Separador de previsão de mercado no simulador <i>ITEM-Game</i> .	32
Figura 9 – Ambiente de trabalho <i>Python v2.7.6</i> através de linha de comandos.	33
Figura 10 – Ambiente de trabalho <i>Python v2.7.6</i> através do <i>IDLE</i> .	34
Figura 11 – Ciclo representativo do processo de interação entre programas com estratégias realizadas.	34
Figura 12 – Capacidade Total instalada por central no mercado simulado.	36
Figura 13 – Capacidade Disponível instalada por central no mercado simulado.	36
Figura 14 – Lucro obtido pelos jogadores individualmente em 4 testes de mercado utilizando estratégias iguais.	48
Figura 15 – Variação dos preços das matérias-primas por ronda Ma/Ma.	49
Figura 16 – Potência vendida por central existente no portfólio de cada jogador Ma/Ma.	49
Figura 17 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação B/B.	50
Figura 18 – Potência vendida por central existente no portfólio de cada jogador Ma/B.	51
Figura 19 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação Ma/B.	52
Figura 20 – Lucro obtido pelos 3 jogadores na simulação Ma/B.	52
Figura 21 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação Me/Ma.	53
Figura 22 – Lucro obtido pelos 3 jogadores na simulação Me/Ma.	54
Figura 23 – Potência vendida por central existente no portfólio de cada jogador B/Me.	55
Figura 24 – Variação dos preços das matérias-primas por ronda B/Me.	55
Figura 25 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação B/Me.	56
Figura 26 – Lucro obtido pelos 3 jogadores na simulação Me/Ma.	56
Figura 27 – Potência vendida por central existente no portfólio de cada jogador B/Me.	57
Figura 28 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação U/B.	58
Figura 29 – Lucro obtido pelos 3 jogadores na simulação U/B.	58
Figura 30 – Lucro obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.1.	61
Figura 31 – PP obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.1.	62

Figura 32 – Potência vendida pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.1.....	62
Figura 33 – Lucro obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.2.	63
Figura 34 – PP obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.2.	64
Figura 35 - Potência vendida pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.2.....	65
Figura 36 – Curva de preços de oferta de todos os jogadores na 10ª ronda com o jogador 3 a utilizar a estratégia de custos médios.	66
Figura 37 – Curva de preços de oferta de todos os jogadores na 10ª ronda com o jogador 3 a utilizar a estratégia de <i>bid-up</i>	66
Figura 38 – Lucro obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.3.	67
Figura 39 – PP obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.3.	67
Figura 40 – Potência vendida pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.3.....	68
Figura 41 – Curva de preços de oferta de todos os jogadores na 10ª ronda com o jogador 3 a utilizar a estratégia de <i>bid-up</i>	69
Figura 42 – Curva de preços de oferta de todos os jogadores na 10ª ronda com o jogador 3 a utilizar a estratégia de custos médios.	69
Figura 43 – Lucro obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.3.	70
Figura 44 – PP obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.4.	71
Figura 45 – Potência vendida pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.4.....	71
Figura 46 – Janela com diversos parâmetros do simulador ITEM-Game.	86
Figura 47 – Linha de comandos utilizando o comando <code>cd</code> com a pasta especificada.	87
Figura 48 – Comando final utilizado para executar o simulador e o programa desenvolvido em Python.	87

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo faz-se uma introdução prévia à dissertação, a motivação para realizar este projeto, os objetivos que se pretende ao realizar as simulações e análises e uma descrição sumária de cada capítulo.

1. Introdução

1.1. Motivação

Com a liberalização dos mercados de energia elétrica, houve um aumento de concorrência entre os diferentes produtores de energia, que têm como objetivo o aumento do seu lucro. Para tal, é necessário reformular as estratégias de investimento e comercialização que foram criadas previamente a esta liberalização. Esta reformulação vai incorporar novas variáveis que advêm das diferentes empresas rivais, e das suas estratégias desenvolvidas. Estas novas estratégias permitem uma perceção mais realista do mercado e dos seus participantes, tendo em conta não só as variáveis de mercado, mas também as empresas rivais e as suas estratégias desenvolvidas.

1.2. Objetivos

Este projeto foca-se no mercado de energia elétrico liberalizado e tem como objetivo a formulação de estratégias de comercialização que visam a maximização do lucro de uma empresa de geração. A principal variável a ser analisada é o preço de oferta de cada empresa para uma determinada central elétrica. Para tal é realizada uma análise ao mercado, analisando o funcionamento das componentes existentes. O objetivo desta análise passa por uma maior compreensão do mercado e dos custos associados a construção e manutenção de cada central elétrica, tais como os custos de produção, operação manutenção e custos de investimento. De seguida é analisada a influência da procura do consumidor no preço de oferta, e como se pode maximizar o lucro tendo em consideração a procura do consumidor.

Um dos grandes objetos de análise neste projeto é a interação entre diferentes empresas e estratégias de comercialização. Vão ser analisadas 4 estratégias distintas, de forma a observar a sua influência no lucro obtido no mercado simulado, com estratégias de empresas rivais que podem ser semelhantes ou distintas das estratégias em análise. Esta análise permite observar a evolução de diferentes variáveis de mercado (tais como o preço das matérias-primas, preço do combustível, entre outras) consoante a estratégia utilizada. Por sua vez isto permite obter uma análise completa do mercado, utilizando essa análise na criação de uma resposta ótima.

Para tal, vai ser utilizado o simulador “ITEM-Game” como plataforma de simulação para estudo do mercado e a linguagem de programação “Python” como ponte entre o simulador e as estratégias desenvolvidas.

Estes são os aspetos gerais a ser abordados neste projeto, de forma a obter uma maior compreensão do mercado, que vão influenciar as estratégias desenvolvidas.

1.3. Descrição sumária

Esta dissertação está subdividida em 6 capítulos, onde os primeiros 2 capítulos são capítulos relativos à componente teórica em relação ao estudo a ser realizado. Os 2 capítulos seguintes são relativos à componente prática e por fim existe um capítulo com conclusões e outro com referências bibliográficas.

O primeiro capítulo serve de resumo e introdução relativamente ao projeto realizado, de forma a dar a entender a motivação por detrás deste projeto.

O segundo capítulo serve como introdução aos mercados de energia elétricos, onde descreve as diferentes fontes de energia, e como estas são transformadas em energia elétrica para posteriormente ser vendida no mercado de energia elétrico. Retrata a reforma realizada sobre os mercados elétricos, a evolução que estes tiveram até ao presente dia. Contém uma descrição do funcionamento do mercado elétrico, tendo em conta diversos tipos de variáveis e características que o compõe. Os mercados europeus existentes também são analisados, analisando o funcionamento de cada um. Em termos de mercado, ainda existe um subcapítulo que retrata o mercado português e a sua evolução desde um mercado monopolista até à sua liberalização.

De seguida, ainda no segundo capítulo, são retratadas análises das diferentes estratégias de investimento e comercialização de energia existentes hoje em dia, que vão servir de base para o desenvolvimento de novas estratégias, apresentando melhorias ou servindo de referência para novas estratégias. É de salientar que neste capítulo existe ênfase nas estratégias de comercialização, que vão ser o principal objetivo de estudo nesta dissertação.

Por fim, existe um subcapítulo dedicado à teoria de jogos, e como esta é aplicada no contexto do mercado elétrico liberalizado, desde os diferentes tipos de jogos existentes até ao equilíbrio de Nash, objeto de estudo nesta dissertação.

O sexto capítulo apresenta o modelo na estruturação das estratégias, onde existem dois capítulos introdutórios ao *software* “ITEM-Game” e à linguagem de programação “Python”, que são ferramentas essenciais no estudo destas novas estratégias. Após a introdução destas ferramentas, vai ser descrito os modelos utilizados para cada estratégia desenvolvida.

O sétimo capítulo tem como foco as simulações realizadas utilizando cada estratégia, onde são descritos posteriormente os resultados, e onde é realizada uma análise de cada um dos resultados obtidos.

Capítulo 2

Estado da Arte

O estado da arte engloba uma explicação sobre o mercado elétrico em termos gerais, desde a produção à comercialização de energia, apresentando as variáveis preponderantes e as características inerentes do mercado. É discutido o mercado a nível nacional e internacional, a sua estrutura e o seu funcionamento. De seguida realiza-se uma análise de estratégias de mercado, que poderão servir de ponte para estratégias a utilizar nesta dissertação. Por último é realizada uma pequena introdução à teoria de jogos e a todas as suas características

2. Estado da arte

Para uma compreensão do mercado, é necessário possuir um vasto conhecimento sobre as diversas variáveis que o influenciam. Este capítulo explica o conceito de mercado elétrico, abordando diversos aspetos, desde a sua evolução a conceitos e variáveis inerentes ao mercado.

2.1. Mercados elétricos

Atualmente é produzida uma grande quantidade de energia elétrica, utilizando diferentes tecnologias nessa produção, que é obtida através de fontes primárias existentes no nosso planeta, tais como a energia nuclear, o carvão, o gás natural, o sol, o vento e a água [1]. Fontes como a energia nuclear, o carvão e o gás natural são fontes de energia fósseis, e a sua exploração e utilização contínuas não acompanha a sua produção natural, como matéria-prima. Estas fontes de energia fósseis são dominantes no nosso planeta, tendo um impacto muito grande na civilização, sendo que compõem a maior parte da produção de energia atualmente. Fontes como o carvão e o gás são poluentes, quando transformadas em energia, seja através de uma central de carvão ou uma central de ciclo combinado (no caso do gás), pelo que a sua utilização contínua vai ter implicações ambientais que já podem ser observadas nos dias de hoje.

No caso da energia nuclear, esta é uma fonte de energia limpa, uma vez que não polui o meio ambiente de uma forma invasiva, como no caso do carvão e do gás, mas a matéria-prima necessária (urânio) para a sua utilização é limitada no meio ambiente, sendo que estudos apontam para uma reserva de apenas 30 anos [2]. Também existe o risco de contaminação por radiação, que ocorre quando um operador entra em contacto com o urânio, sendo este radioativo, o que pode provocar problemas de saúde [3].

No outro espectro, existem fontes de energia renováveis que são bastante benéficas para o nosso meio ambiente, mas que têm como desvantagem a sua falta de exploração e desenvolvimento, pois só recentemente é que existe a tecnologia necessária para a sua exploração. Dados fornecidos pela REN21 mostram a existência de um crescimento contínuo de fontes de energia renováveis. Entre o ano 2011 e 2012, houve um aumento de 19% de consumo de energia renovável em termos globais [4]. Fontes de energia como o vento e o sol estão bastante dependentes de condições que não podem ser controladas pelo ser humano, o que se torna um problema para a sua utilização em grande escala de forma contínua. São utilizadas centrais eólicas e painéis fotovoltaicos para a conversão da matéria-prima em energia. Por outro lado, já existem possibilidades de obter um fluxo de energia hídrica contínuo, com a introdução de barragens, sendo que estas podem armazenar energia para a sua produção em determinados períodos.

Com estas fontes primárias, é possível passar a conversão desta matéria-prima para energia elétrica, através de diferentes tipos de centrais.

Após a obtenção de energia elétrica da parte das centrais, esta vai ser transportada e distribuída pelos consumidores finais, onde os produtores desta energia estão sujeitos ao mercado de energia elétrica, que é regulado por uma entidade competente e imparcial.

2.2. Variáveis do mercado elétrico

Para que haja uma boa compreensão do mercado, é necessário existir um conhecimento de conceitos específicos do mesmo, tais como:

- Oferta;
- Preço de oferta ou *bid*;
- Procura.

A oferta é o valor de potência produzida pelas empresas de geração que está a ser vendida. Ao conjunto total de potência produzida pelos produtores de energia, denomina-se oferta de mercado. Esta oferta vem adjacente a um determinado preço, que se denomina de preço de oferta

O preço de oferta ou *bid*, é a potência que está a ser disponibilizada ao mercado associada a um determinado preço em €/MWh. O preço de oferta é um dos grandes objetos de estudo desta dissertação, pois o objetivo é obter o maior lucro possível, e para o atingir é necessário delinear uma estratégia que otimize o preço de oferta realizado pela empresa, de forma a obter-se o maior lucro possível. Esta componente está fortemente associada a estratégias de comercialização

Por fim a procura é a necessidade energética do mercado, ou seja, dos consumidores. A procura vai influenciar os preços de oferta, sendo que uma maior procura pode simbolizar um aumento de ofertas casadas, tal como pode ocorrer o oposto com uma menor procura. A procura é uma das variáveis de mercado cuja previsão foi objeto de estudo de diversos artigos [5], pois ao prever a procura, podem ser otimizadas as estratégias de comercialização, dando uma vantagem sobre empresas rivais.

No mercado de energia elétrica, os diferentes produtores de energia, de diversas tecnologias podem licitar a potência das suas centrais a um determinado preço, o preço de oferta. Este preço é otimizado individualmente, sendo que o lucro está intrinsecamente ligado a cada estratégia realizada. No mercado, existem diversas variáveis e componentes que têm de ser analisadas com cuidado, de forma a prever qual a estratégia ótima a utilizar. Algumas das variáveis ligadas aos diferentes preços de oferta existentes está relacionada com os preços das

matérias-primas, devido tanto a influências externas como no caso do aumento do combustível, ou influências internas ao mercado. Estes vão desempenhar um grande papel na evolução do mercado, sendo que um aumento do preço de combustível, pode levar a um aumento de centrais de ciclo combinado ou a carvão por exemplo.

Relacionado com o mercado estão as emissões de CO₂. Devido à utilização de centrais a carvão e de ciclo combinado, também vai existir um aumento de poluição atmosférica inerentes a essas centrais, tais como outros tipos de poluições ambientais, externas ao mercado elétrico. Foi introduzido o protocolo de Quioto, que visa à redução das emissões de CO₂. O protocolo de Quioto propôs a redução da emissão de gases nocivos à atmosfera em 5%, desde o período 2008 até ao período 2012, que foi aceite pela União Europeia [6]. Este protocolo influencia a quantidade de emissão de gases que as centrais podem emitir, consoante a produção de gases nocivos para a atmosfera de cada país.

Como pode ser observado, o mercado não depende só das componentes que o compõem, mas também de diversos fatores externos. Logo, ao desenvolver estratégias de comercialização, existe uma necessidade de fazer uma análise global a cada variável, não limitando essa análise somente ao mercado.

Após a análise da parte das empresas de geração, estas vendem a sua potência produzida com um determinado preço de oferta, e posteriormente pode observar se o preço de oferta oferecido casa com a procura do consumidor. Existem três casos possíveis neste tipo de situações. No primeiro caso a energia fornecida pelo produtor casa totalmente com a procura do consumidor, pelo que irá receber a totalidade do preço de mercado estabelecido para si. No segundo caso, a energia fornecida pelo produtor casa parcialmente com a procura do consumidor, o que faz com que este não receba a totalidade do preço de mercado, mas sim uma percentagem que será variável, consoante o número de ofertas nesse valor. A última possibilidade admite que a energia fornecida não casa com a procura e o produtor tem prejuízo. Este último cenário é o cenário que qualquer produtor de energia quer evitar, pois não lhe é benéfico.

Toda esta transição de preço de ofertas, como o mercado em si, é gerida por uma entidade reguladora cujo objetivo é manter a transparência e igualdade com todos os participantes do mercado, aplicando sanções aos que não respeitarem as regras de cada mercado elétrico.

2.3. Características do mercado de elétrico

Consoante o número de empresas produtoras de energia existentes no mercado, existem três tipos de situações que podem ocorrer influenciando diretamente o mercado e os seus preços, sendo estes apresentados e explicados em seguida:

- Monopólio;
- Oligopólio;
- Concorrência Perfeita.

O monopólio é um dos casos extremos do mercado, onde uma empresa domina totalmente o mercado, ou seja, consegue estabelecer o preço que quer, conforme as suas necessidades. Isto é benéfico para a empresa em questão, mas não beneficia em nada o consumidor final, ou seja, não tem um elevado bem-estar social, porém, o lucro obtido pela empresa é máximo. Habitualmente esta situação deve-se à inexistência de outras empresas (com poder semelhantes à empresa monopolística).

O oligopólio é o caso intermédio do mercado, onde existem poucas empresas no mercado, para que estas possam ter um controlo parcial, mas nunca um controlo total do mercado, ou seja, estas empresas vão ter uma influência parcial no caso de marcar preço, mas dificilmente vão conseguir marcar preço da mesma maneira que uma empresa monopolista o consegue fazer. Este é o caso que mais se aproxima a realidade em que vivemos, onde existe algum controlo do mercado, embora este seja parcial.

Por último, no caso de concorrência perfeita, existem muitas empresas no mercado, ou seja, estas empresas não vão conseguir influenciar o preço devido ao número de empresas que se encontra no mercado. Este tipo de concorrência permite que o bem-estar social seja máximo, porém as empresas não conseguem obter o máximo lucro possível, devido à pouca influência de mercado que vão obter.

Estes três cenários influenciam o preço de mercado, o que por um lado pode beneficiar os produtores de energia, pelo outro prejudica os consumidores finais, e vice-versa. Tem de existir um equilíbrio para que ambos possam obter vantagens do mercado, sendo que a liberalização dos mercados elétricos tem sido um passo grande para esse objetivo.

A liberalização dos mercados tem como objetivo a introdução de produtores externos no mercado, onde o consumidor final é livre de escolher o fornecedor de energia. Previamente isto não era possível, com o modelo antigo, pois eram controlados por empresas do estado ou privadas, monopolísticas [7]. O primeiro país que reformulou o seu mercado, introduzindo um mercado de

energia liberalizado foi o Reino Unido, em 1990, sendo que deste então, diversos países adotaram modelos baseados no modelo de liberalização britânico [8].

2.4. Mercados europeus

Existe uma grande diversidade de mercados na europa, tendo cada país uma regulamentação e entidades que o regem. Este capítulo visa a compreensão de algum dos mercados existentes em diferentes países da europa, do seu funcionamento e dos mercados grossistas existentes. O mercado grossista de eletricidade é caracterizado pela produção de energia elétrica, onde os agentes intervenientes na produção responsabilizam-se pela colocação da energia no mercado, e os consumidores finais responsabilizam-se pela compra da energia dos produtores [9].

➤ Reino Unido:

No Reino Unido, o mercado elétrico pertence ao setor privado, ou seja, o mercado encontra-se liberalizado, onde cada consumidor final é livre de escolher a empresa fornecedora de energia. A estrutura do mercado do Reino Unido é semelhante à estrutura ibérica, onde existem produtores de energia individuais ligados à rede de transporte nacional, que no caso do Reino Unido é gerida pela empresa *National Grid*. Esta empresa tem como objetivo o transporte seguro e eficaz de energia através redes elétricas criadas com o propósito de transportar energia a longas distâncias [10].

O mercado grossista que fornece uma plataforma de troca de energia é gerido pela empresa *APX power UK*, sendo o seu funcionamento baseado em leilões de dia seguinte, tendo por objetivo a venda e compra de energia para cada hora do dia [11].

A entidade reguladora do mercado e de todos os seus participantes é a empresa *ofgem* – *Office of Gas and Electricity Market*, podendo aceder a informação relativa às diferentes empresas, impor coimas e sancionar as empresas em caso de não cumprirem com as diretrizes impostas pelo governo e pelo próprio mercado [12].

➤ **Alemanha:**

O mercado alemão pré 1998 era um mercado monopolista, sendo que nesse período deu-se a sua liberalização, existindo centenas de empresas de geração com capacidade de fornecer a procura exigida pelo consumidor final [13]. O mercado grossista é gerido pela empresa *EEX – European Energy Exchange* que é sediada em Leipzig e que inclui o mercado *EPEX – European Power Exchange*. Este último mercado engloba a Alemanha, França, Áustria e Suíça, sendo que representa mais de um terço do consumo total europeu [14]. O mercado alemão foi um dos primeiros mercados na Europa a permitir preços de oferta negativos, sendo a justificativa para tal a grande quantidade de centrais renováveis existentes no país, que compõem cerca de 15,1% da procura anual e que têm custos marginais muito baixos. Logo, se o custo de funcionamento ou de encerramento por determinados períodos de tempo de centrais não renováveis for elevado, estas centrais podem utilizar preços de oferta negativos, de forma a permitir que não paguem esses custos e continuem em funcionamento [15].

➤ **França:**

A liberalização do mercado francês deu-se entre 2000 e 2001, com a criação e implementação da empresa *Powernext S.A.*, que tem como objetivo servir de plataforma para o mercado grossista [16]. A quantidade de energia negociada nesse mercado representa 4% da potência produzida na França, o que simboliza uma percentagem bastante inferior em relação a mercados de outros países [17]. O modelo utilizado pelo mercado é semelhante ao modelo britânico, utilizando leilões do dia seguinte, e o transporte de energia é garantido pela empresa *RTE – Réseau de transport d'électricité*.

➤ **Mercado Nórdico:**

O mercado nórdico é composto pela Noruega, Dinamarca, Suécia, Finlândia, Estónia, Letónia e Lituânia. Criado em 1993 e sediado na Noruega, este mercado sofreu duas expansões, em 1996 para a Suécia e em 1998 para a Finlândia. Em 2000 a Dinamarca integra o mercado, e mais recentemente a Estónia, Letónia e Lituânia, em 2010, 2012 e 2013 [18].

Este mercado foi criado através da empresa *NordPool*, e tem 370 empresas de 20 países a realizar trocas diariamente, o que o torna num dos maiores mercados europeus existentes. O processo de compra e venda de energia é semelhante aos outros mercados anteriormente mencionados, sendo que se cruza a oferta do produtor com a procura do consumidor para determinar o preço de oferta para uma determinada hora do dia seguinte, como exemplifica a Figura 1 e Figura 2.

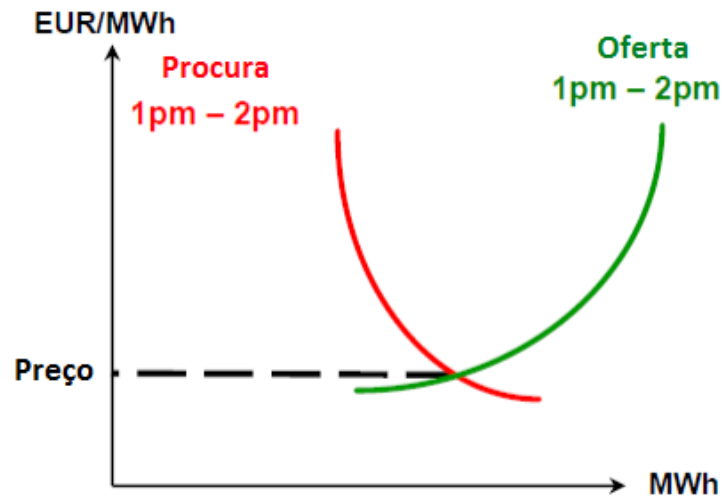


Figura 1 – Curvas de procura e de oferta para uma determinada hora. Fonte: NordPool [19].

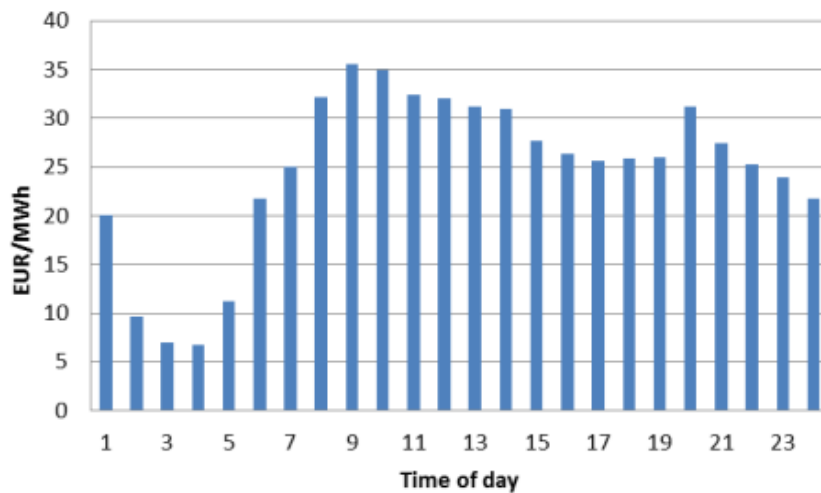


Figura 2 – Preços de oferta para o dia 22 de Setembro de 2011. Fonte: NordPool [19].

2.5. Mercado elétrico em Portugal

Antes de ter sido reformado, o mercado de energia elétrica português tinha uma estrutura verticalmente integrada, em que sectores como a produção, transporte, comercialização, distribuição entre outros eram todos regidos por uma entidade, que no caso de Portugal era controlada pelo governo. Este mercado continha todas as características de um mercado monopolista, sendo que era possível que esta empresa obtivesse a maximização do seu lucro.

Tal como foi verificado em outros mercados, este tipo de mercado não era ideal para os consumidores finais, pelo que o bem-estar social era baixo comparativamente a outros mercados liberalizados. Foi então introduzida uma reformulação do mercado português em 1995 com o

Decreto-Lei nº182/95 [20] em que seria eliminada esta estrutura verticalmente integrada, onde o SEN fosse subdividido em dois subsistemas distintos, o sistema elétrico de serviço público (SEP) e o sistema elétrico independente (SEI). Posteriormente em 2006 é assinado um novo acordo que revoga o anteriormente descrito, acordo este que pretende a junção do mercado português com o mercado espanhol, formando o mercado elétrico ibérico (MIBEL). Este mercado vem melhorar a estrutura anteriormente reformada, introduzindo o modelo liberalizado utilizado hoje em dia, para que exista uma introdução de novas empresas de forma a competiram para a obtenção de lucro. A estrutura do mercado utilizada atualmente pode ser observada na Figura 3.



Figura 3 – Estrutura mercado elétrico português. Fonte: EDP [21].

Para regulamentar o mercado, foi criada uma entidade denominada de Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE), cujo objetivo é a supervisão do mercado ibérico quanto à promoção da concorrência neste sector e a defesa dos direitos de todos os consumidores finais existentes neste mercado [22]. Esta regulamentação é fundamental para manter a transparência e concorrência do mercado, para que este evolua, tornando-se mais eficiente. Para tal acontecer, a ERSE criou um sistema de monitorização do mercado, denominado de SIMER (Sistema de Informação de Mercados), que acompanha o mercado grossista de eletricidade.

2.6. MIBEL

O MIBEL tem como objetivo estruturar o mercado ibérico para que este seja um mercado de livre concorrência, objetivo, com regras e uma estrutura uniforme para ambos os países (Portugal e Espanha), principalmente na definição do preço. O mercado passou então a ter um modelo com separação vertical e horizontal, bastante distinto do modelo verticalmente integrado inicial. Com esta reestruturação, qualquer consumidor na península ibérica pode obter energia elétrica de qualquer produtor, seja este português ou espanhol. Os princípios propostos pelo Decreto-Lei n.º 29/2006 [23] são os de liberdade de acesso, não discriminação, imparcialidade nas decisões, entre outros, que têm como o objetivo a competitividade saudável entre as diferentes empresas de geração.

Com a introdução do MIBEL foram criadas duas entidades denominadas por OMIP e OMIE, com uma estrutura bipolar interligada.

A OMIP (Operador do Mercado Ibérico de Energia) foi criado em 2003, e tem como objetivo a gestão do mercado a prazo, nomeadamente da negociação da energia elétrica a prazo, que é gerida pelo pólo português [24]. A OMIP apresenta como principais objetivos:

- Fornecer instrumentos de gestão de risco eficientes;
- Contribuir para a evolução do mercado ibérico.

Regulamentar diversos aspetos do mercado, tais como a admissão dos participantes, a divulgação de informação importante aos participantes e público geral ativo de mercado, entre outros

A OMIE (*Operador del Mercado Ibérico de Energia*), gere o mercado *spot* ou grossista, mercado este que se distingue pela capacidade de distribuição imediata de energia após a sua compra, contendo uma componente de contratação diária e de ajustes intradiários [24]. A OMIE é gerida pelo pólo espanhol do mercado ibérico, tendo como principais objetivos:

- A gestão económica dos preços dos mercados de eletricidade;
- A liquidação de transações nos mercados de eletricidade.

A OMIE também é responsável por fornecer dados relativos ao mercado, onde se pode observar os preços marginais espanhóis e portugueses, a energia negociada no mercado diário, a média de transação de energia tanto no mercado elétrico espanhol como no português, como outras informações relevantes para todos os participantes neste mercado.

A Figura 4 representa o mercado ibérico no dia 04 de abril de 2014, observando horariamente o valor de energia transitado e o preço a que a esta foi vendida.

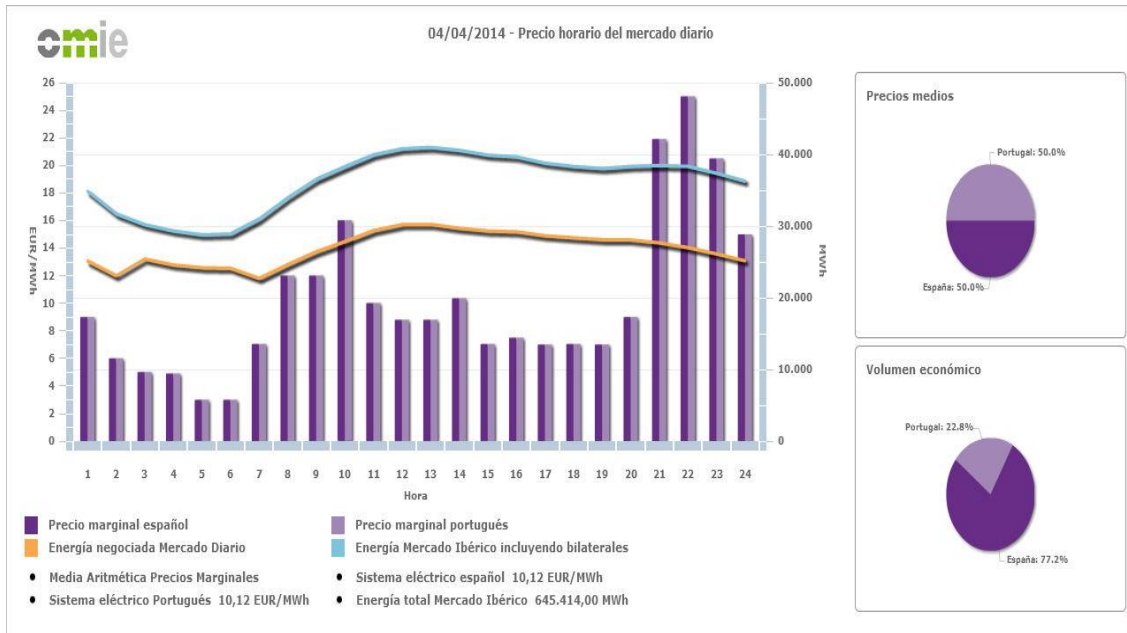


Figura 4 – Informação relativa ao dia 4/4/2014 de mercado ibérico. Fonte: OMIE.

2.7. Análise estratégica do mercado

Existem diversos tipos de estratégias no setor do mercado de energia elétrica, podendo estas ser divididas em duas grandes componentes, estratégias de investimento na geração, e estratégias de comercialização.

2.7.1 Estratégias de investimento

As estratégias de investimento focam-se no investimento e aumento de capacidade de geração, utilizando para tal diversas tecnologias para cumprir esse objetivo. Tal como as estratégias de comercialização, as estratégias de investimento são fundamentais para a obtenção de um maior lucro no mercado elétrico, pois com uma maior capacidade de geração existem possibilidades, tal como limitações, para cumprir esse objetivo. Para tal, é necessário ter uma compreensão do mercado em que o produtor de energia se encontra inserido, para poder estudar as variáveis que se adequam a regulamentação.

Outra característica a ter em conta quando se utilizam estratégias de investimento é o período entre a construção e o comissionamento das centrais. Ao contrário das estratégias de comercialização, nas estratégias de investimento existe um planeamento mais longo em termos temporais, pois existe a necessidade de realizar uma previsão da procura dos consumidores num espaço temporal bastante largo. Desta forma, antes de se realizar qualquer investimento em novas

centrais de tecnologias distintas, é indispensável fazer uma análise temporal da variação da procura, para que possa prever qual a quantidade de energia para suprimir essa necessidade [25].

É fundamental realizar uma avaliação económica do mercado antes de efetuar qualquer investimento em termos de capacidade de geração [26]. Esta avaliação vai indicar a viabilidade de investimento tanto a nível de capacidade de geração, como a nível de uso da tecnologia que vai ser utilizada para tal. Para isso, é necessário ter em conta as vantagens e desvantagens existentes na produção de energia elétrica com determinadas tecnologias, bem como o lucro esperado, para que haja um retorno financeiro e lucro inerente às tecnologias selecionadas.

Em termos de mercado, para que exista um crescimento a nível de investimento, existe a necessidade de criar incentivos para os produtores de energia, para que o mercado seja mais competitivo, e beneficie o consumidor final [27]. Estes incentivos garantem o crescimento contínuo de mercado, o que atrai novos produtores de energia, que por sua vez competirão com outros produtores, reduzindo o preço de oferta de energia, mas obtendo lucro, beneficiando tanto o consumidor como o produtor.

2.7.2 Estratégias de comercialização

Nas estratégias de comercialização, o foco deste projeto, existe um grande número de variáveis a ter em conta na formalização de uma estratégia viável. A variável que se destaca neste aspeto é o risco tomado por uma empresa quando formaliza uma oferta [28]. Ou seja, existe sempre um risco associado a cada estratégia de comercialização, que pode variar, podendo ser uma estratégia com riscos mínimos, com riscos médios, ou de grande risco. Quando uma estratégia é formalizada com o objetivo de minimizar os riscos, pode observar-se que o lucro obtido nem sempre é elevado, onde em determinados cenários, até pode existir uma obtenção de prejuízo. Isto garante uma margem de segurança, porém, como o objetivo principal é a maximização do lucro, este tipo de estratégia não é favorável.

As estratégias com médio ou grande risco, são as que maior lucro obtêm, mas também podem acarretar um maior prejuízo em caso do preço de oferta não casar com a procura do consumidor. Para se otimizar o lucro obtido, faz-se um estudo do risco associado a cada estratégia, onde se minimiza ao máximo o risco e se garante ao máximo lucros consideráveis.

Para se poder prever o comportamento do mercado, minimizando assim o risco associado com cada estratégia de comercialização, faz-se uma análise das variáveis que o compõem [5]. Analisando todas as variáveis do mercado e o seu comportamento, podem ser observados determinados padrões, que vão ser estudados para que se possa maximizar o lucro quando as condições estudadas anteriormente surjam. Isto torna o desenvolvimento de estratégias de

comercialização mais simplificado, pois analisando os diferentes padrões de mercado, tais como os padrões das empresas que competem entre si, pode formalizar-se uma estratégia que consiga prever esse comportamento, fornecendo uma resposta otimizada, que vise o aumento do lucro do utilizador, em comparação com as outras empresas.

Após o estudo do mercado e os seus padrões, oficializa-se a oferta, otimizando o preço de oferta, através da realização de diversos estudos na otimização de ofertas [29]. Na formalização de uma oferta, há que ter em conta o preço a que vamos associar a cada MW de potência, sendo que se pode vender a energia de cada central por blocos, ou seja, para uma determinada central, pode variar-se os preços por escalões, o que aumenta a complexidade mas também oferece soluções diversificadas na obtenção de lucro. Um dos aspetos a ter em conta na formalização da oferta é o preço de pool (PP).

A *pool* é um termo associado ao preço de fecho de mercado, sendo que o maior preço de oferta que casou com a procura do consumidor marca esse preço. Este preço posteriormente será o preço €/MWh pelo qual cada empresa recebe, desta forma uniformizando o valor recebido por cada empresa, sendo que existem mercados que utilizam outros modelos, tais como o modelo *pay-as-bid*, onde cada empresa recebe o valor que propôs na sua oferta [30].

Na formalização de estratégias de comercialização, há que ter em conta o número de empresas existentes no mercado, tal como as centrais elétricas de cada uma dessas empresas. Estas duas variáveis têm uma grande influência no mercado. Uma vez que existem muitas empresas concorrentes, o lucro de cada uma empresa diminui, aproximando-se do modelo de concorrência perfeita. Por outro lado, se existirem poucas empresas, o fator decisivo entre ambas poderá ser o número de centrais e potência, onde uma empresa com um maior número de centrais com maior potência poderá ter uma maior influência no mercado, pois tem mais facilidade em marcar preço do que outras empresas. Porém, nem sempre é positivo ter um número maior de centrais, pois se os custos variáveis forem elevados, estas empresas têm o risco de obter grandes prejuízos [31].

Na Tabela 1 pode observar-se os conceitos explorados e desenvolvidos neste projeto.

Tabela 1 – Conceitos desenvolvidos no projeto

Conceito	Descrição
Graus de Risco	Utilização de estratégias com graus de risco distintos.
Análise Mercado	Análise das variáveis de mercado e implementação no preço de oferta.
Número de Centrais	Utilização de um número de centrais que permita a existência de competição (Oligopólio).

2.8. Teoria de jogos

Através da teoria de jogos, pode-se analisar o mercado por um prisma distinto do convencional, traçando uma imagem paralela. No mercado elétrico existem características que podem ser equiparadas com características de jogos (tais como o jogo das damas), onde não é possível saber antemão a jogada dos adversários (neste caso empresas rivais). Este tipo de abordagem é bastante utilizada, em diversos cenários, em que é necessário realizar uma decisão estratégica, pois permite estudar e analisar diversos aspetos do conceito em estudo, simplificando o mesmo ao isolar determinadas variáveis [32] [33].

Existem diversas variantes na teoria de jogos, consoante o tipo de jogo que mais se enquadra numa determinada situação. Existem jogos cooperativos e não cooperativos, onde no caso dos jogos cooperativos um ou mais jogadores podem formar uma aliança de forma a obter um melhor resultado para ambos os jogadores [34]. Já em jogos não cooperativos, cada jogador joga individualmente, onde a sua melhor resposta dependerá unicamente da informação que se encontra ao seu dispor, em termos individuais.

Em termos de informação, existem jogos de informação perfeita e imperfeita, em que jogos de informação perfeita são jogos em que um jogador, antes de tomar qualquer decisão, sabe todas as decisões tomadas previamente pelos outros jogadores existentes. Um exemplo deste tipo de jogos são os jogos sequenciais, como demonstrado na Figura 5, em que utilizando as possíveis decisões dos líderes John Kennedy e Nikita Khrushchev no período de guerra fria, em 1963, pode-se construir um jogo sequencial com cada decisão e resposta a essa decisão da parte dos líderes de cada nação [35].

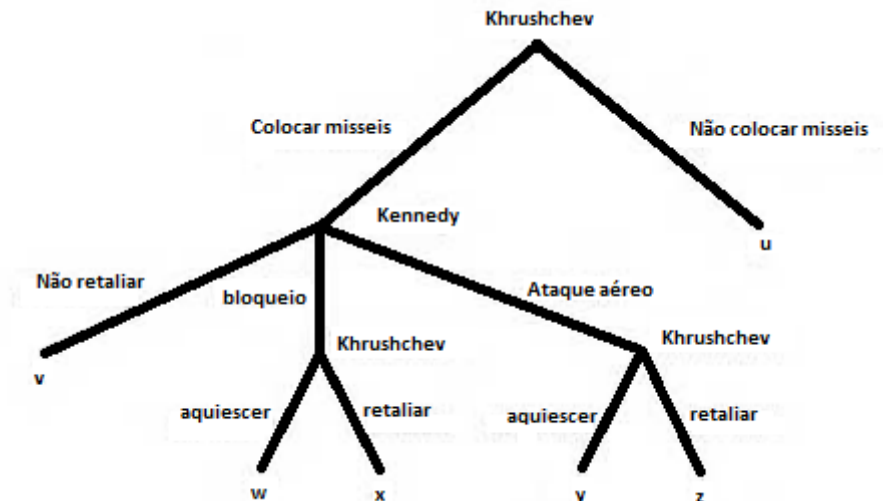


Figura 5 – Jogo sequencial ilustrativo da crise dos mísseis em Cuba, 1963 [35].

Os jogos de informação imperfeita são jogos em que um jogador não tem informação relativa à decisão tomada pelos seus adversários quando toma a sua decisão. Um exemplo destes jogos são jogos simultâneos, em que as decisões têm de ser tomadas simultaneamente para todos os jogadores, como é o exemplo do mercado elétrico, que ao estabelecer preços de oferta em leilões do dia seguinte, não é possível obter a informação relativa a empresas rivais.

Pode-se estabelecer dois grupos de jogos, o primeiro é um jogo de soma zero, em que um jogador tenta maximizar o seu resultado enquanto outro jogador adversário tenta minimizar esse resultado [36]. Um exemplo deste jogo é o típico jogo de futebol, onde uma equipa procura ganhar o jogo, marcando golos, enquanto a outra equipa pretende minimizar esse efeito. O ganho de um jogador neste cenário encontra-se diretamente relacionado com a perda dos jogadores adversários. O outro grupo são os jogos com soma diferente de zero, onde um ganho de um jogador não resulta da perda de outros jogadores [37]. Este grupo de jogos pode ser aplicado ao mercado elétrico, onde o ganho de um jogador pode implicar ganhos para outros jogadores, tal como marcar um PP elevado, obtendo um maior lucro, o que por sua vez pode implicar um maior lucro para empresas rivais, devido ao aumento desse PP.

Também existem jogos simétricos e assimétricos, onde no caso dos jogos assimétricos a estratégia desenvolvida não depende unicamente das estratégias adversárias existentes, mas sim dos jogadores que as utilizam. Ou seja, este tipo de jogos estão dependentes de outros jogadores, em que a estratégia do jogador difere consoante o seu adversário.

Em jogos simétricos o resultado obtido depende só das estratégias utilizadas, tanto pelo jogador, como por jogadores adversários. Um exemplo deste jogo é o dilema do prisioneiro, em que dois prisioneiros podem tomar duas decisões individualmente, confessar o crime que

cometeram, ou não confessar, sendo que independentemente da decisão do jogador rival, cada jogador tomará a decisão que lhe permitirá obter melhores resultados. [35].

Tabela 2 – Matriz do dilema do prisioneiro.

	J2 – Não Confessa	J2 – Confessa
J1 – Não Confessa	1,1	3,0
J1 – Confessa	0,3	2,2

Pode observar-se na Tabela 2 que se o jogador 1 estiver a jogar não cooperativamente, a melhor resposta do mesmo é confessar, pois na matriz pode observar-se que nessa situação, o resultado mínimo que pode obter é 1, evitando obter o pior resultado – 3. Se o jogador 2 utilizar a mesma racionalidade, então a sua estratégia também será confessar o crime, pelo que ambos os jogadores encontram-se num ponto de equilíbrio, denominado de equilíbrio de Nash.

Os equilíbrios de Nash ocorrem em casos não cooperativos, quando um jogador utiliza uma determinada estratégia que é equilíbrio, sendo que se divergisse dessa estratégia, os resultados esperados seriam piores do que na situação considerada ideal. Este equilíbrio pode ser previsto, para que os jogadores possam reagir e analisar qual será a sua resposta ótima ao jogarem não cooperativamente, como qual será a estratégia dos outros jogadores, sendo que a procura pelos diferentes equilíbrios de Nash pode dar ao jogador uma vantagem estratégica, bem como evoluções do mercado a longo prazo [38].

O conceito de equilíbrio de Nash permite às diferentes empresas traçar uma estratégia otimizada, sendo que vão ser consideradas todas as estratégias possíveis e todos os equilíbrios existentes no jogo face a essas estratégias, obtendo assim o melhor cenário para cada uma das possibilidades.

Capítulo 3

Modelo e Estratégias

Apresenta-se o modelo a utilizar para as simulações e análises realizadas nesta dissertação. Faz-se uma introdução da linguagem de programação *Python*, bem como o *software* utilizado para a realização das estratégias. Demonstra-se as 4 estratégias desenvolvidas para serem analisadas e estudadas em detalhe.

3. Modelo e estratégias

3.1. Simulador ITEM-Game

Para a realização das diferentes estratégias de comercialização de energia, foi utilizado o simulador ITEM-Game [39]. Este simulador tem como objetivo recriar um mercado de energia elétrica, onde pode existir um número ilimitado de utilizadores ou jogadores. Este simulador utiliza variáveis semelhantes às existentes no mercado real, variáveis tais como o preço das emissões de CO₂, do carvão, do gás, do urânio são fornecidas no simulador.

Este simulador funciona num período configurável de rondas (e.g., 10 rondas), onde cada ronda representa o período de tempo de um ano de mercado. O objetivo de cada jogador é obter o maior lucro possível ao fim das 10 rondas, onde o jogador com o maior lucro é considerado o vencedor. Para tal, em cada ronda é necessário que o jogador realize decisões de investimento, onde existem 6 tecnologias/centrais diferentes para investir, sendo que cada uma dessas tecnologias tem diferentes capacidades, custos de investimento, eficiência (no caso da Nuclear, Carvão, Ciclo de gás combinado – CCGT) e de rendimento (no caso da Hídrica, Eólica e Solar). Por fim, todas as tecnologias também têm diferentes custos de emissão de CO₂. Todos os valores mencionados encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 3 – Tecnologias/Centrais ITEM-Game.

Tecnologias	Capacidade [MW]	Eficiência/Rendimento [%]	Emissões específicas de CO₂ [tonCO₂/MWh]	Investimento [M€]
Nuclear	1000	30	0.0	900
Carvão	500	40	1.0	160
CCGT	400	60	0.4	60
Hídrica	100	35	0.0	50
Eólica	20	25	0.0	20
Solar	20	30	0.0	40

1) O simulador ITEM-Game tem na sua interface 4 separadores distintos, em que em cada um tem um objetivo específico. O primeiro separador serve para investir nas diferentes tecnologias existentes neste simulador, sendo que se pode investir num maior número de

tecnologias quanto maior for o investimento do jogador. Este investimento advém de lucros de períodos anteriores, ou 200 M€, no caso da primeira ronda. Cada tecnologia tem períodos de construção e operacionais, onde após investir em uma ou mais tecnologias, existe um período de construção em que o jogador não pode usufruir imediatamente das tecnologias investidas. Após esse período de construção, a tecnologia fica disponível durante um período denominado de período operacional, sendo que no fim desse período o jogador deixa de ter a central disponível. Na Figura 6 encontra-se o primeiro separador do simulador *ITEM-Game*.

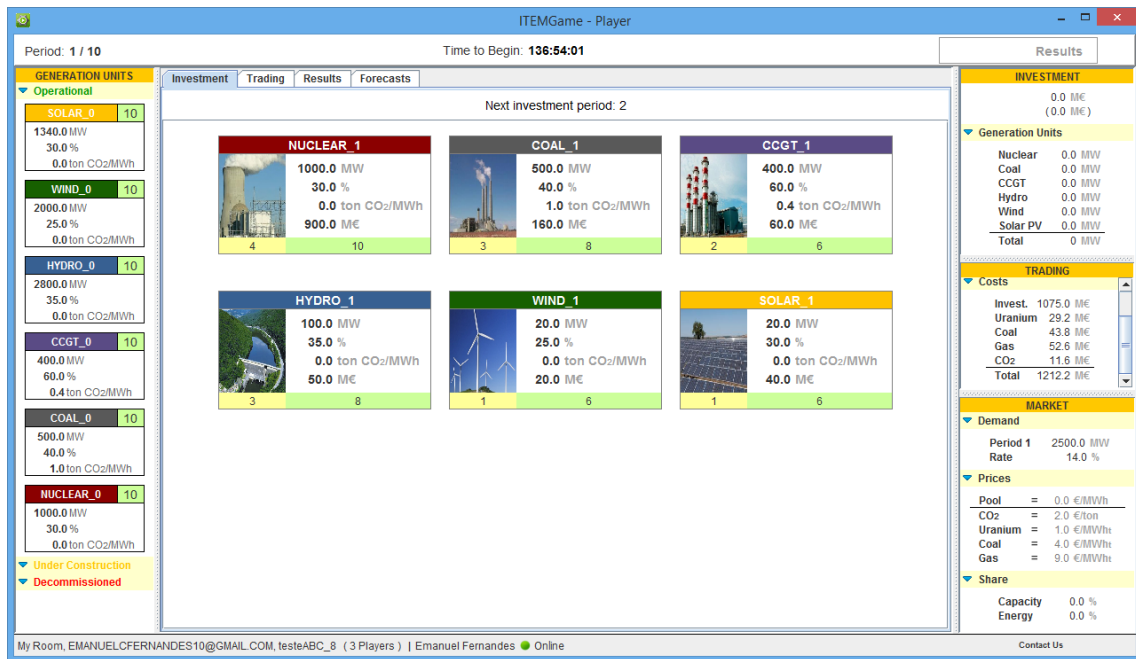


Figura 6 – Separador de investimento no simulador *ITEM-Game*.

Como pode ser observado, à esquerda da figura tem-se as centrais ativas, que estão a ser construídas e as que já se encontram inativas. À direita pode-se observar toda a informação relativa ao investimento, à comercialização e ao mercado em si, tais como os preços da matéria-prima. No centro é possível observar as tecnologias que o jogador poderá investir, tal como acima disso o tempo de jogo.

2) No segundo separador pode-se vender a energia que se encontra no portfólio de cada jogador, onde um jogador que tenha comprado anteriormente uma determinada central, possa agora vender a energia dessa central por um determinado preço. Para vender a energia da central, o jogador pode separar a potência da central por blocos, sendo que não necessita de vender a totalidade da potência a um preço único, podendo vender por escalões de preço, o que torna a necessidade de utilização de estratégias de comercialização importantes. Este separador pode ser observado na Figura 7.

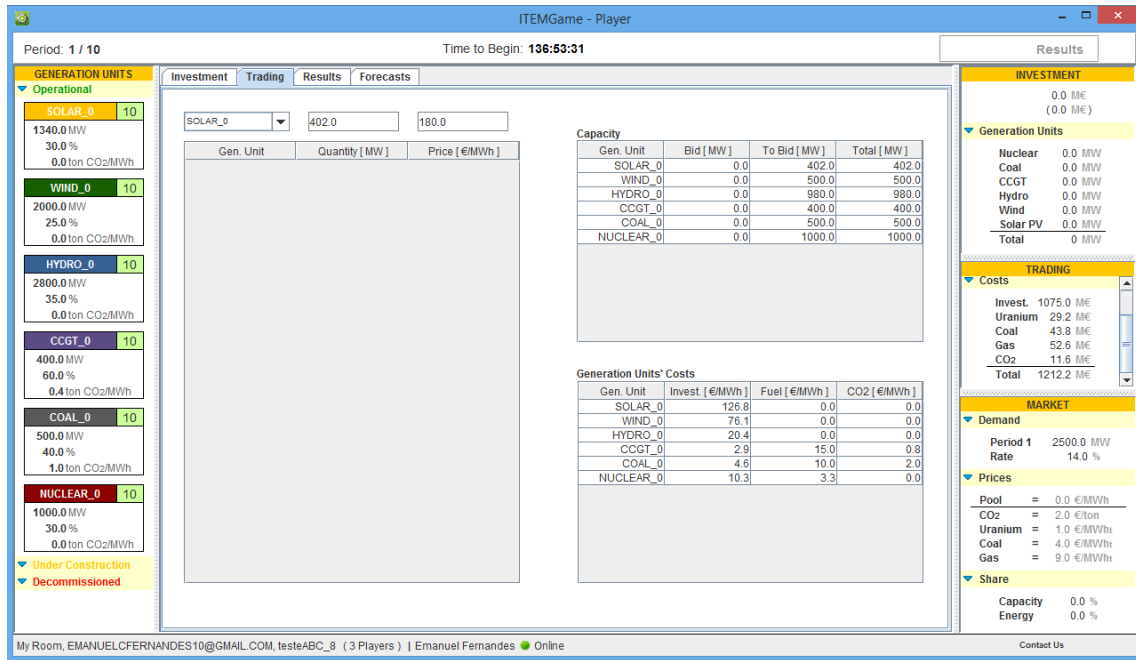


Figura 7 – Separador de comercialização no simulador *ITEM-Game*.

Como pode ser observado, existem 2 tabelas à direita cujo objetivo é passar a informação ao jogador de qual a capacidade de cada central que se encontra operacional, bem como os custos de investimento, de combustível e de CO₂. Na tabela que se encontra à esquerda do separador, é o local onde cada jogador vende a sua energia a um determinado preço de oferta, subdividindo essa energia em blocos que estejam de acordo com a estratégia estipulada pelo jogador.

3) No terceiro separador pode analisar-se os resultados referentes ao período anterior, tais como o lucro de cada jogador, o preço de venda por tecnologia de cada jogador e quais as licitações que casaram ou não com a procura do consumidor.

4) Por último existe o separador de previsão de mercado, onde é exibido um gráfico que representa a procura do consumidor e a quantidade de energia existente no mercado, até ao período t+7. Também existe uma tabela com os valores de oferta e procura de cada período, tal como a margem de reserva. Este gráfico pode ser observado na Figura 8.

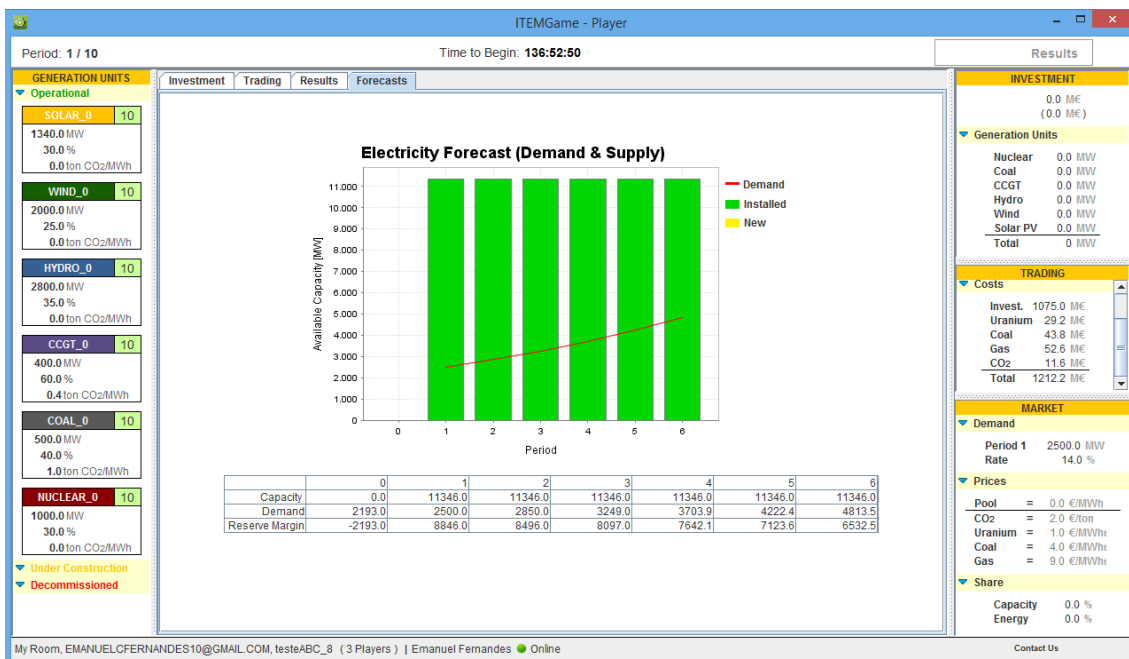


Figura 8 – Separador de previsão de mercado no simulador *ITEM-Game*.

Neste último separador, pode ser observado um gráfico com a totalidade de potência existente no mercado, bem como a curva de procura do consumidor. Ainda existe uma tabela abaixo do gráfico onde se pode obter a informação relativa a cada ronda, desde o período t até $t+7$, onde é calculada a capacidade de cada ronda, a procura e a margem de reserva.

Para se obter o máximo lucro possível, é necessário desenvolver estratégias que não só tenham em conta as ações tomadas da parte do investidor, mas também ter em conta as atitudes do adversário, sendo que estas serão determinantes na obtenção do objetivo principal.

3.2. Programação Python

A linguagem de programação *Python* foi criada em 1990 por Guido van Rossum, na Holanda, com o objetivo criar uma linguagem de programação simples e de fácil utilização.

É uma das linguagens mais simplistas e poderosas existentes nos dias de hoje. Uma das grandes vantagens da linguagem de programação *Python* é o facto de ser *open-source* (código fonte aberto), o que significa que não existem custos para a sua utilização, podendo ser modificado e utilizado por qualquer utilizador. Este aspeto é bastante vantajoso, pois cria uma biblioteca de informação volumosa, pois como não existem custos, existe muita informação, funções e bibliotecas virtuais sobre a linguagem de programação [40].

Esta linguagem de programação apresenta uma grande compatibilidade com todos os sistemas operativos, devidas as suas características, que podem ser livremente alteradas por cada utilizador, o que tornam qualquer programa criado em *Python* compatível com todos os sistemas operativos conhecidos.

Devido a estas características, a programação *Python* tornou-se numa das linguagens mais utilizadas mundialmente, tanto a nível académico como a nível profissional.

Existem dois ambientes de trabalho distintos no *Python*:

- Ambiente de trabalho através de linha de comandos;
- Ambiente de trabalho IDLE (*Integrated Development Environment*).

O ambiente de trabalho através da linha de comandos permite a execução de programas já criados de *Python*, sem ter utilizar o IDLE. Isto permite um acesso mais simplista na realização de programas básicos. O ambiente de trabalho através de linha de comandos pode ser observado na Figura 9.

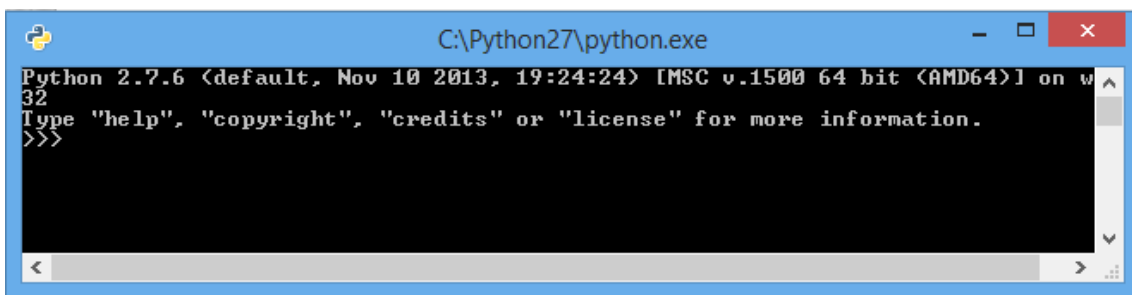


Figura 9 – Ambiente de trabalho *Python* v2.7.6 através de linha de comandos.

O ambiente de trabalho IDLE simplifica a escrita e depuração de código, pois incorporado no programa existem diversas ferramentas que podem ser utilizadas, em conjunto com um editor, que corrige e destaca erros no código criado. Isto torna a aprendizagem de *Python* muito mais intuitiva, o que permite a criação de programas mais simples. Na Figura 10 pode observar-se o ambiente de trabalho IDLE.

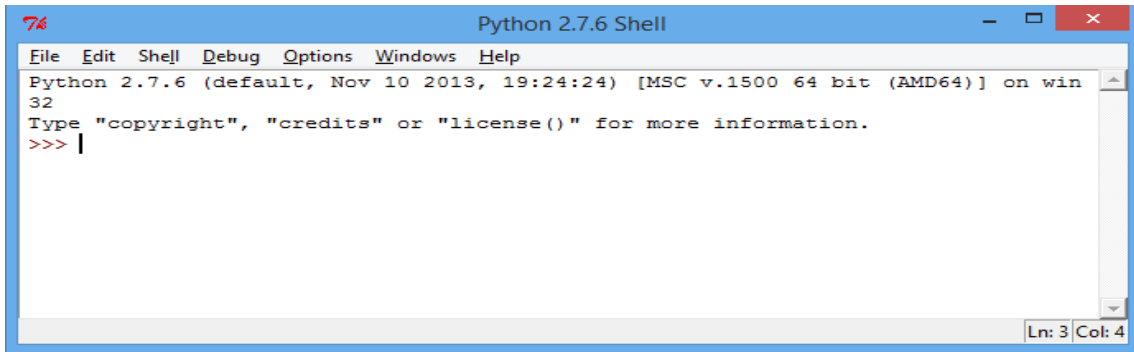


Figura 10 – Ambiente de trabalho *Python v2.7.6* através do *IDLE*.

3.3. Interação entre *Python* e *ITEM-Game*

Para que se possam desenvolver estratégias de comercialização utilizando a linguagem de programação *Python* para o mercado criado pelo *ITEM-Game*, foi criado um ciclo em que conseguimos estabelecer a relação entre os intervenientes, apresentado na Figura 11.



Figura 11 – Ciclo representativo do processo de interação entre programas com estratégias realizadas.

Desta forma, pode ser observado que ao executar o programa realizado em *Python*, este cria um ficheiro no formato XML (Extensible Markup Language) contendo todos os comandos a realizar no *ITEM-Game*, que por sua vez irá ler e interpretar este ficheiro como um ficheiro de *input* realizando a jogada com os comandos impostos pelo programa *Python*. Após o *ITEM-Game* terminar a ronda, vai criar um ficheiro de output no formato xml com todos os resultados obtidos do mercado simulado, que posteriormente será interpretado pelo programa *Python*, para que este execute o código para obter um novo *input* tendo em consideração as características fornecidas pelo output do *ITEM-Game*.

3.4. Estratégias desenvolvidas

Neste capítulo, são retratadas as diferentes estratégias utilizadas nas simulações, sendo que é explicado o processo de cada estratégia.

3.4.1 Estratégia de investimento

Como o objetivo de estudo é as estratégias de comercialização, é necessário considerar a estratégia de investimento, para que esta não influencie a estratégia de comercialização.

Para tal, foi considerado que cada jogador terá no seu portfólio desde a primeira ronda o número de centrais demonstrado pela Tabela 4 – Portfólio inicial de cada jogador.

Tabela 4 – Portfólio inicial de cada jogador

Centrais	Número de Centrais
Nuclear	1
Carvão	1
CCGT	1
Hídrica	10
Eólica	25
Solar	20

Na Figura 12 e Figura 13 pode observar-se a potência total instalada por central, e a potência disponível por central, sendo que a disponível terá um valor inferior, pois tem em consideração o fator de capacidade e rendimento de cada central.

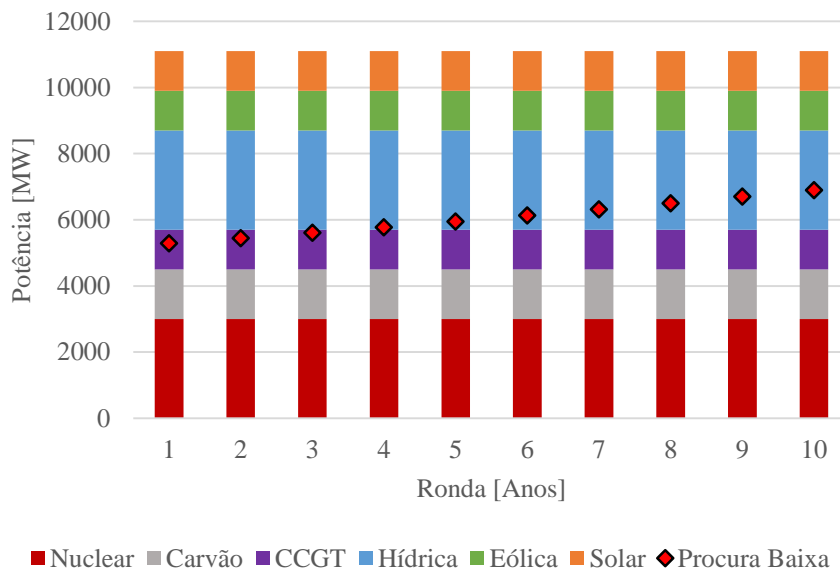


Figura 12 – Capacidade Total instalada por central no mercado simulado.

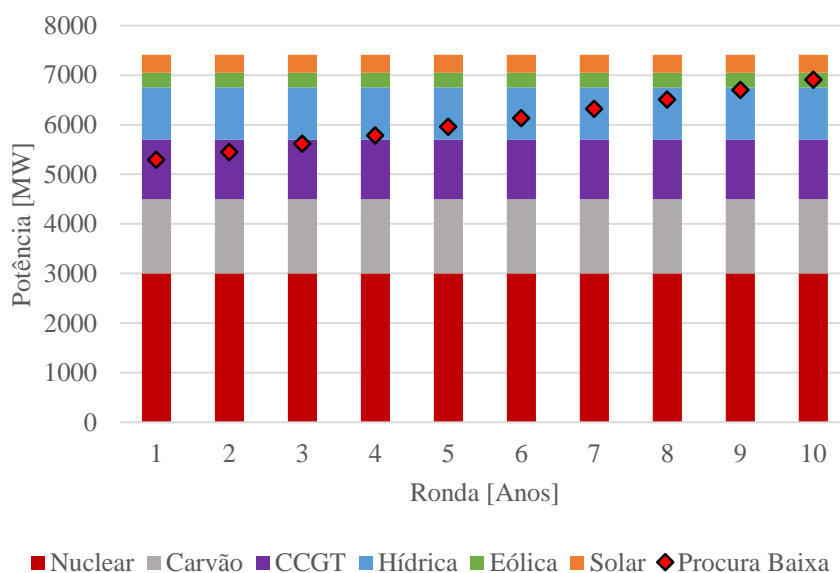


Figura 13 – Capacidade Disponível instalada por central no mercado simulado.

3.4.2 Cálculos iniciais comuns às estratégias desenvolvidas

Neste subcapítulo apresentam-se cálculos que são comuns a todas as estratégias, de forma a poder prever e analisar o mercado.

Inicialmente é necessário calcular os diferentes custos que vão ser utilizados posteriormente pelas estratégias desenvolvidas. Para tal, primeiro é calculado o custo de investimento de cada tecnologia para a ronda t (1.1).

$$C_t^{inv} = \frac{\frac{I}{O_p} \cdot 10^6}{P_i \cdot 8766} \quad (0.1)$$

Onde:

I – Investimento em cada tecnologia em M€.

O_p – Períodos de operação em Anos.

P_i - Potência de cada central por tecnologia i em MW.

De seguida, calcula-se o custo do *fuel* (1.2) e das emissões específicas de carbono (1.3).

$$C_t^{fuel} = \frac{P_t^{mat}}{\eta_i} \quad (0.2)$$

Onde:

P_t^{mat} - Preço do *fuel* em M€.

η_i – Rendimento de cada central por tecnologia i em %.

$$C_t^{CO2} = p_t^{mat} \cdot SE \quad (0.3)$$

Onde:

SE – Emissões específicas do CO₂ em €/MWh.

Por fim calculam-se os custos marginais (1.4) e médios (1.5) de cada tecnologia.

$$C_t^{var} = C_t^{fuel} + C_t^{CO2} \quad (0.4)$$

$$C_t^{med} = C_t^{inv} + C_t^{var} \quad (0.5)$$

Depois de calculado cada custo associado à formalização das estratégias de comercialização, esta vai ter em conta a margem de reserva fornecida no separador *forecast* do ITEM-Game. Abaixo pode observar-se a equação (1.6) que traduz o cálculo da margem de reserva.

$$R_M = O_f - D \quad (0.6)$$

Onde:

O_f – Oferta total do mercado no período t em MW.

D – Procura total do mercado no período t em MW.

Após obter a margem de reserva para o período t , de forma a poder analisar o mercado em detalhe, vai ser estudado e analisado o mercado desde o período t até ao período $t+5$, pelo que a equação da margem de reserva em (0.6) será utilizada de forma a englobar essa previsão, como apresentado em (1.7).

$$\sum_{i=t}^{t+5} R_M = \sum_t^5 (O_f - D) \quad (0.7)$$

3.4.3 Estratégia de comercialização EC.1 – Custos Marginais

A estratégia EC.1 vai definir a primeira estratégia de comercialização, utilizando para tal a potência das centrais elétricas operacionais, sendo que existe um mercado para o qual pode definir-se o preço por MW de cada uma das centrais. Esta estratégia é uma estratégia simples que tem por objetivo a utilização de custos marginais como preço de oferta. Pode-se definir um vetor (1.8) que englobe tanto a potência que está a ser oferecida, como o preço da oferta.

$$\{q_{i,b}, \pi_{i,b}\}_t \quad (0.8)$$

Onde:

q – quantidade de energia oferecida em MW.

π – Preço de oferta em €/MWh.

i - Tecnologia.

b – Número de blocos de potência.

Para todas as estratégias, a quantidade de energia oferecida, é definida a equação (1.9), tendo em conta o rendimento de cada central (salientando que o rendimento da Nuclear, Carvão e CCGT é de 100%).

$$q_{i,b} = \frac{P_i \cdot \eta_i}{b} \quad (0.9)$$

Onde:

P_i – Potência de cada central em MW.

η_i – Rendimento de cada central em %.

No caso do preço de oferta, este pode ser determinado como demonstrado na equação (1.10).

$$\pi_{i,b} = C_{i,t}^{var} \quad (0.10)$$

Onde:

$C_{i,t}^{var}$ – Custos marginais da tecnologia i , no período t .

Como pode ser observado, nesta estratégia, o preço de oferta será igual ao custo marginais de cada central sendo que desta forma, garante-se que a empresa cobre sempre os custos de funcionamento da central.

Esta estratégia é de risco baixo, pois utiliza como preço de oferta o custo marginal, o preço de oferta mais baixo das 4 estratégias desenvolvidas, de forma a casar a maior quantidade de potência possível com a procura do consumidor.

3.4.4 Estratégia de comercialização EC.2 – Custos Médios

Esta estratégia será semelhante à estratégia EC.1, sendo que em vez de se utilizar os custos marginais como preço de oferta, serão utilizados os custos médios de cada central, que incluem os custos marginais e os custos de investimento, como pode ser observado na equação (0.5).

A equação utilizada para a definição da quantidade de energia oferecida é estabelecida pela equação (0.9), definida anteriormente.

Para o preço de oferta, este pode ser simbolizado por (1.11).

$$\pi_{i,b} = C_{i,t}^{med} \quad (0.11)$$

Onde:

$C_{i,t}^{med}$ – Custos médios da tecnologia i, no período t.

Para esta estratégia, o preço de oferta será igual aos custos médios de cada central, para que esta consiga cobrir ambos os custos (investimento e marginais).

Esta estratégia é de risco intermédio/alto, pois adiciona aos custos de funcionamento das centrais o custo de investimento, contudo tem o risco de existirem preços de oferta mais competitivos em relação a esta estratégia.

3.4.5 Estratégia de comercialização EC.3 – Bid-Up

Nesta estratégia foi introduzido uma ordem de mérito, que vai ser calculada utilizando os custos totais de cada central, onde a central com custos médios menores obterá o primeiro lugar na ordem de mérito, no segundo lugar estará a central com os segundos menores custos médios, e assim sucessivamente. Esta ordem de mérito pode ser observada através da Tabela 5.

Tabela 5 – Ordem de Mérito E.I.2.

Centrais	Custos Médios [€/MWh]	Ordem de mérito
Nuclear	15	2°
Carvão	25	4°
CCGT	10	1°
Hídrica	23	3°
Solar	54	5°
Eólica	72	6°

Após o cálculo da ordem de mérito, esta estratégia introduz o conceito de *bid-up*, que se trata de um parâmetro ε que conjuntamente com o custo médio vai estabelecer preços de oferta com um valor acrescido, para que seja possível obter um maior lucro.

A equação utilizada para a definição da quantidade de energia oferecida é estabelecida pela equação (0.9), definida anteriormente.

No caso do preço de oferta, é definida a equação (1.12).

$$\pi_{i,b} = C_{i,t}^{med} + \varepsilon \cdot C_{i,t}^{med} \quad (0.12)$$

Onde:

ε – Fator de *bid-up* dependente da ordem de mérito, em %/100.

$C_{i,t}^{med}$ – Custos médios da tecnologia i , no período t .

Como se pode constatar, esta estratégia diverge da EC.2 ao utilizar um fator de acréscimo aos custos médios. Este parâmetro encontra-se dependente da ordem de mérito estabelecida, sendo que para cada tecnologia, irá existir um acréscimo distinto, consoante o seu posicionamento na ordem de mérito. De seguida podem ser observados os valores de ε consoante a ordem de mérito formulada anteriormente.

Tabela 6 – Valor Épsilon.

Ordem de mérito	ε
CCGT	+50 %
Nuclear	+40%
Hídrica	+30%
Carvão	+20%
Solar	+10%
Eólica	0

Desta forma, é possível observar que a central que tem os custos médios menores terá um acréscimo de 50% ao seu preço de oferta inicial, sendo este raciocínio utilizado para as restantes centrais na ordem de mérito.

Esta estratégia é uma estratégia de risco elevado, pois utiliza o parâmetro ε para aumentar o seu preço de oferta, sendo entre as 4 estratégias a que obtém maiores preços de oferta. Contudo, um maior preço de oferta pode não traduzir um maior lucro, sendo que esta estratégia encontra-se suscetível a preços de oferta mais competitivos por parte de outras empresas.

3.4.6 Estratégia de comercialização EC.4 – Undercut

Esta estratégia tem como foco principal as tecnologias existentes no mercado, e os seus custos marginais. Para cada custo marginal de determinada tecnologia de um jogador rival, se outro jogador tiver a tecnologia que tem custos marginais inferiores a esse jogador rival, pode fazer *undercut* ao jogador rival. O conceito de *undercut* envolve o aumento dos custos marginais da tecnologia até serem próximos, contudo ainda inferiores aos dos outros jogadores, aumentando assim o lucro obtido para o jogador em questão.

A equação utilizada para a definição da quantidade de energia oferecida é estabelecida pela equação (0.9), definida anteriormente.

No cálculo do preço de oferta, este tem de englobar os custos marginais rivais e do próprio utilizador, como demonstrado na equação (1.13).

$$\pi_{i,b} = C_{i,t}^{var^u} + \left(C_{i,t}^{var^r} - C_{i,t}^{var^u} \right) \cdot \alpha \quad (0.13)$$

Onde:

$C_t^{var^u}$ - Custos marginais do utilizador em €/MWh.

$C_t^{var^r}$ - Custos marginais do rival em €/MWh.

α – Fator de *undercut* em %/100.

Como pode ser observado, ao incluir os custos marginais rivais e do utilizador, é possível fazer *undercut* a empresas rivais, aumentando o PP, que permite uma obtenção de maior lucro.

Esta estratégia é a estratégia mais complexa das 4 estratégias realizadas, apresentando um grau de risco baixo, devido a utilização de custos marginais como base de comparação entre as diversas centrais.

Capítulo 4

Simulações e Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos das diversas simulações realizadas utilizando 3 jogadores. Também se apresentam os equilíbrios de Nash por ronda, e uma explicação detalhada da sua obtenção. Por último faz-se um estudo de cada estratégia individualmente e dos seus benefícios.

4. Simulações e resultados

As simulações realizadas têm como base comum 3 jogadores distintos (J1, J2, J3) onde cada jogador utiliza uma estratégia predeterminada que poderá ser igual ou distinta dos restantes jogadores.

A nomenclatura utilizada para identificar as simulações foi X/Y, no qual X representa a estratégia do jogador 1 e 2 e Y a estratégia do jogador 3.

Cada jogo tem um período de 10 rondas que será imutável durante as simulações. A procura inicial será de 5291 MW com uma procura baixa, que terá um crescimento de 3% por ronda. O preço máximo de pool definido será de 180 €/MWh.

As simulações realizadas tiveram em consideração cada estratégia mencionada anteriormente, sendo denominada uma sigla para cada estratégia de forma a ser mais compreensiva e intuitiva a perceção de cada simulação realizada.

Tabela 7 – Sigla utilizada para cada estratégia simulada.

Estratégia Utilizada	Sigla
EC.1	Ma
EC.2	Me
EC.3	B
EC.4	U

4.1. Análise Ma/Ma; Me/Me; B/B; U/U

Inicialmente foram realizados 4 testes de mercados nos quais os 3 jogadores utilizaram estratégias semelhantes, de forma a obter uma compreensão geral do mercado e sua evolução neste contexto. Ao utilizarem a mesma estratégia, os preços de oferta serão iguais, o que se traduzirá em lucro igual para todos os 3 jogadores

Na Figura 14 pode-se observar o lucro obtido por cada uma destas estratégias por ronda, onde à medida que existe variação dos preços das diferentes matérias-primas e da procura do consumidor, o lucro obtido por cada um dos jogadores por teste também difere.

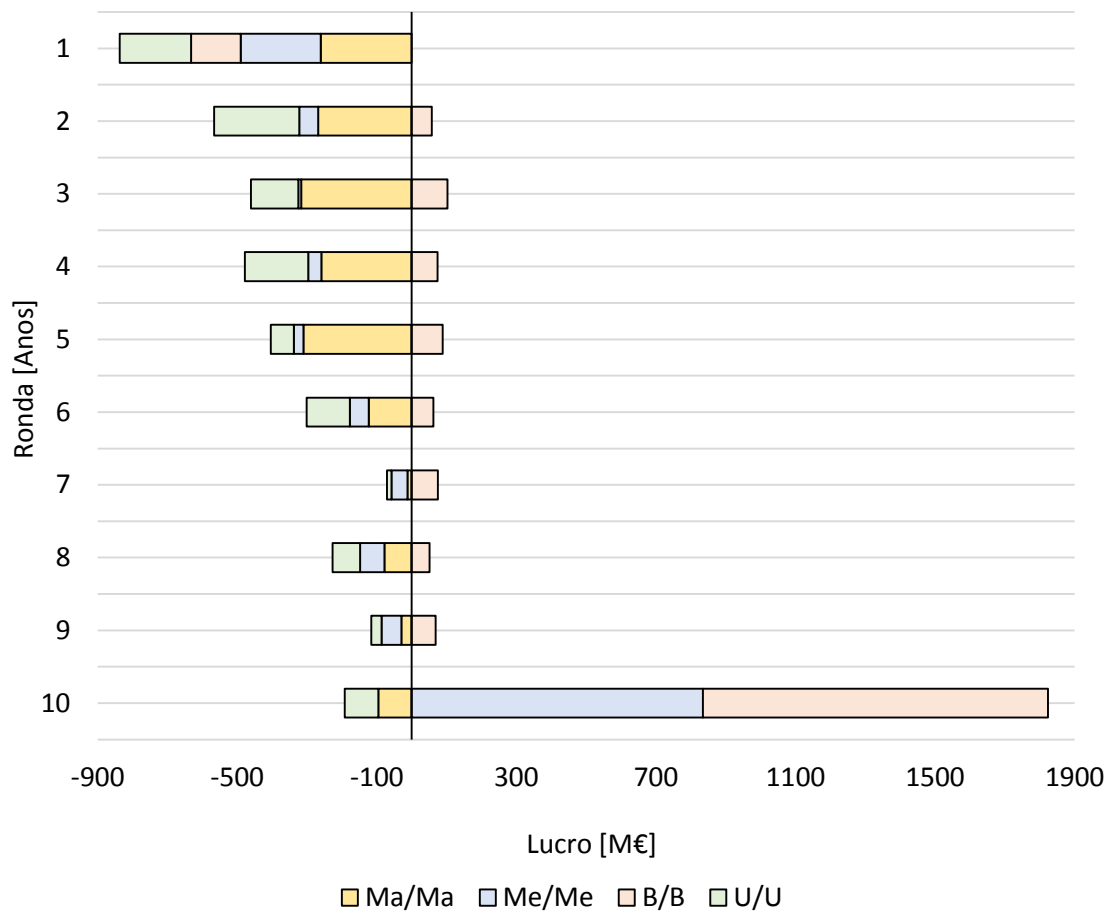


Figura 14 – Lucro obtido pelos jogadores individualmente em 4 testes de mercado utilizando estratégias iguais.

Pode observar-se no 1º teste realizado, onde no mercado vão ser utilizados os custos marginais de cada uma das centrais como preço de oferta, não existe lucro obtido pelos 3 jogadores inseridos nesse mercado, sendo que nas 10 rondas os jogadores apresentam prejuízo.

Este prejuízo varia consoante o aumento da procura e a variação dos preços das matérias-primas, onde se pode observar que o prejuízo decresce de ronda para ronda, sendo o seu valor inicial (na 1ª ronda) de -244,2 M€ e o seu valor final (na 10ª ronda) -96,1 M€. Observando a Figura 15 e Figura 16 pode-se ver a variação dos preços das matérias-primas por ronda e quais as centrais do portfólio de cada jogador que casaram com a procura do consumidor.

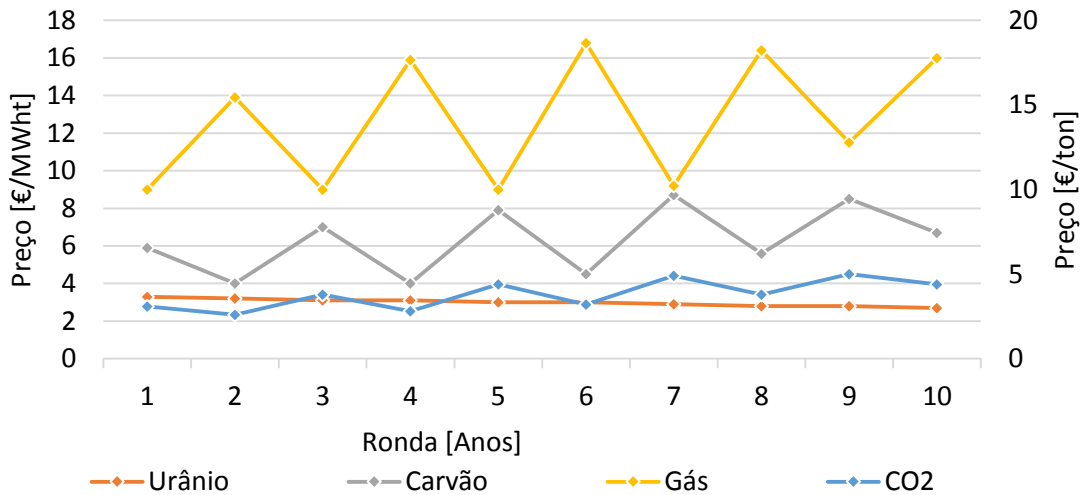


Figura 15 – Variação dos preços das matérias-primas por ronda Ma/Ma.

Analisando os custos das diferentes matérias-primas pode observar-se uma oscilação entre o preço do carvão e o preço do gás. Esta variação encontra-se conjugada com a potência vendida de cada uma das centrais, como se observa na figura abaixo.

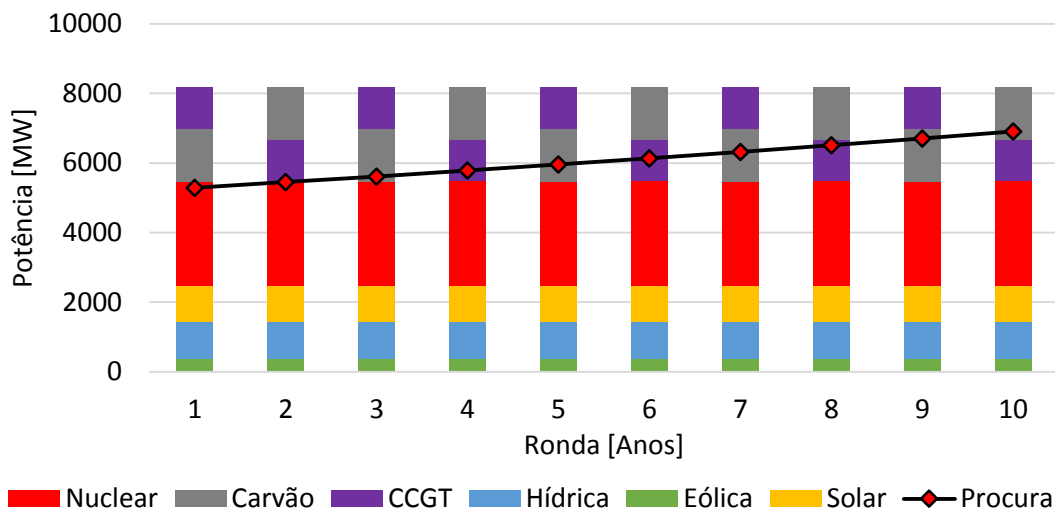


Figura 16 – Potência vendida por central existente no portfólio de cada jogador Ma/Ma.

Como pode ser observado, as centrais a carvão e CCGT variam entre si, similarmente ao que acontece com o preço das matérias-primas exigidas por cada uma destas centrais. Isto ocorre parcialmente devido à potência instalada de cada uma das centrais, sendo que a central a carvão tem uma potência instalada de 500 MW e a central CCGT uma potência instalada de 400 MW. Logo, numa determinada ronda, a central CCGT vende a totalidade da potência instalada, e a central a carvão vende parcialmente a potência instalada, marcando o PP. O preço do carvão vai baixar conseqüentemente, pois não existiu uma procura tão elevada pela matéria-prima, da mesma forma que o preço do gás aumenta, devido à elevada procura pela matéria-prima. Devido a esta variação de preços de matérias-primas, na ronda seguinte, como o carvão tem um custo menor em relação ao gás, isto faz com que o custo marginal da central a carvão seja menor do que o custo marginal da central a gás, havendo uma inversão na central que vai casar na sua totalidade com a procura do consumidor e a central que vai casar parcialmente com a procura do consumidor.

Este fator associado ao facto de que os preços de oferta de cada uma das centrais não cobrem os custos de investimento (ou custos fixos) de cada uma das centrais, dita este prejuízo que se pode observar nas 10 rondas, sendo o fator atenuante o aumento da procura do consumidor.

Em sentido inverso, pode-se observar que no caso do teste em que é utilizada a estratégia de *bid-up*, o lucro obtido é maioritariamente positivo, e na 10ª ronda apresenta o maior lucro obtidos dos 4 testes realizados, com o valor de 988,7 M€.

Este lucro obtido pode ser justificado pelos preços de oferta elevados de cada um dos jogadores, como pode ser observado na Figura 17.

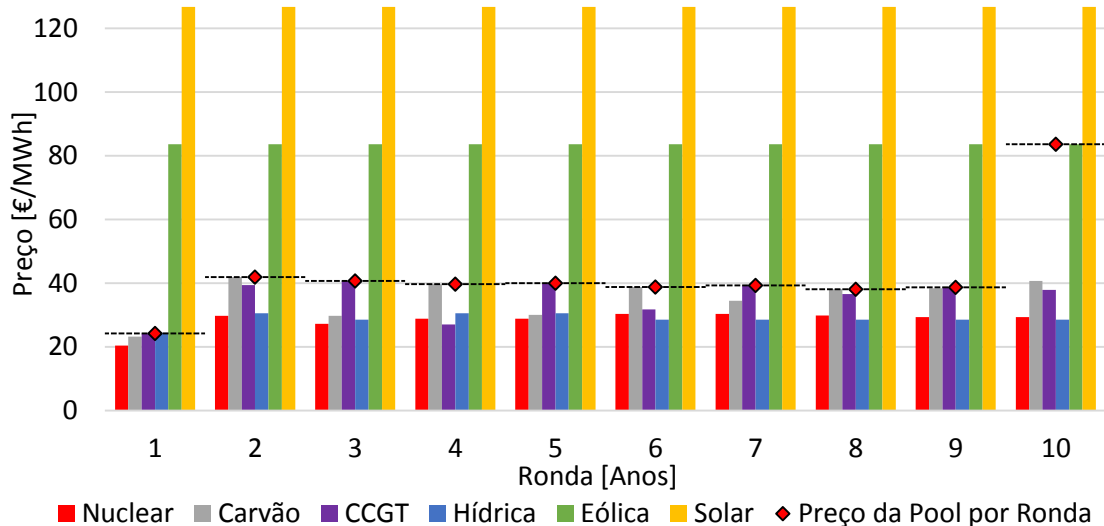


Figura 17 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação B/B.

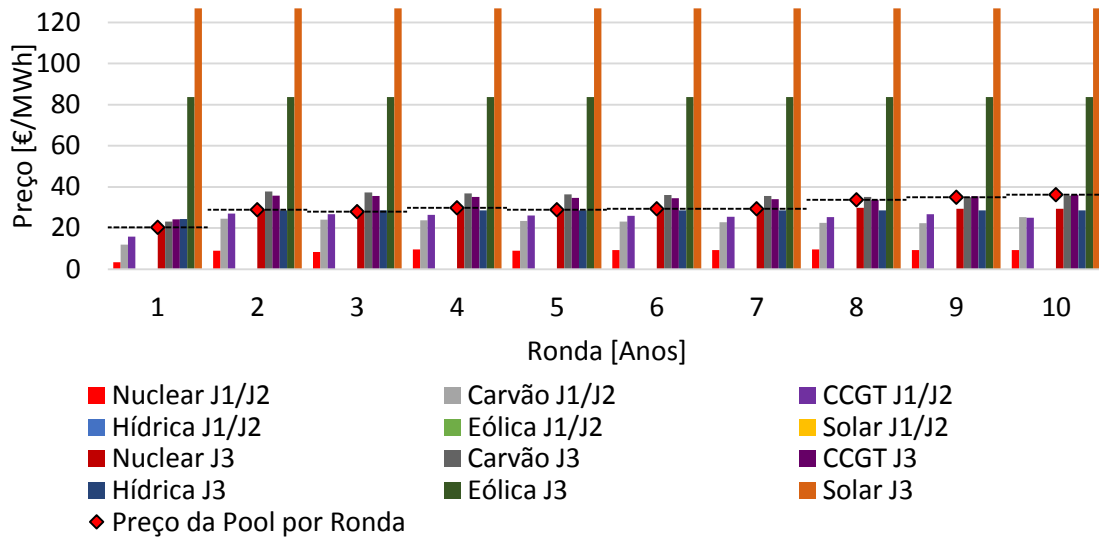


Figura 19 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação Ma/B.

Pode-se observar que os preços de oferta dos jogadores 1 e 2 são muito baixos quando comparados com os preços de oferta do jogador 3, que são bastante mais elevados. Isto faz com que o jogador 3 marque preço para o jogador 1 e 2, o que por sua vez, observando a Figura 20 traduz-se num lucro superior para o jogador 1 e 2.

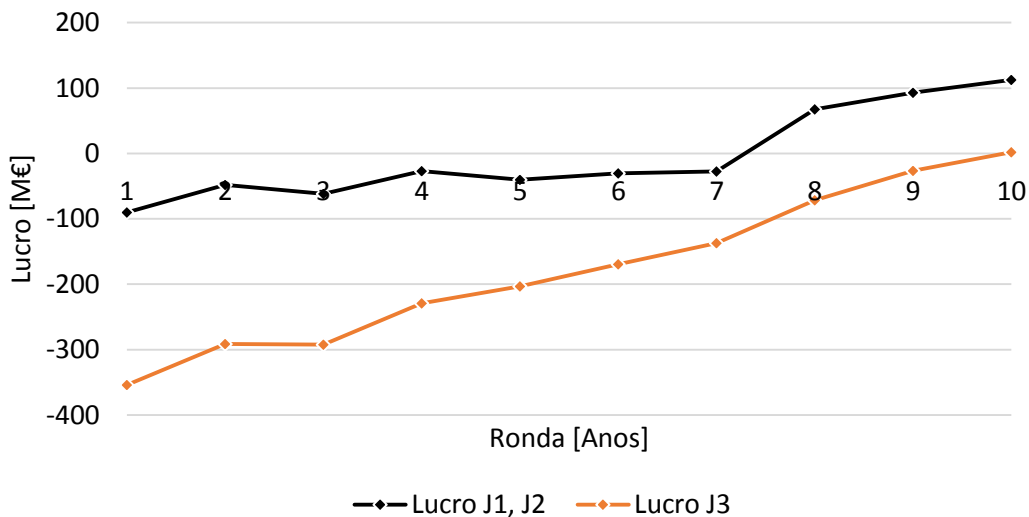


Figura 20 – Lucro obtido pelos 3 jogadores na simulação Ma/B.

Como foi observado, o lucro obtido pelos jogadores 1 e 2 é superior em relação ao lucro obtido pelo jogador 3 (112,6 M€ e 1,8 M€ na ronda 10 respetivamente). Nesta simulação o jogador 3 tomou a decisão de obter um maior lucro em relação á situação inicial, onde os 3 jogadores

utilizavam estratégias de custos marginais. Na situação inicial, recordando a Figura 14, o jogador 3 tinha obtido um prejuízo de 96,1 M€, enquanto nesta simulação o jogador 3 obteve um lucro de 1,8 M€, passando de um prejuízo para um lucro. Contudo, para obter este lucro o jogador 3 marcou preço para o jogador 1 e 2, que por sua vez obtiveram lucros bastante superiores ao do jogador 3, pois conseguiram vender toda a sua potência instalada por uma verba maior, que foi determinada pelo jogador 3. Existiu então um *trade-off*, em que o jogador 3 abdicou de se destacar em relação ao jogador 1 e 2 e preferiu obter lucro invés de prejuízo.

4.3. Análise Me/Ma

Nesta simulação, o jogador 3 pretende aumentar o lucro obtido a partir da situação inicial (Me/Me). Para tal, o jogador 3 diverge para uma estratégia de custos marginais para aproveitar-se dos preços de oferta estabelecidos pelos jogadores 1 e 2, que têm em consideração os custos médios de cada central. Na Figura 21 pode-se observar os preços de oferta dos 3 jogadores.

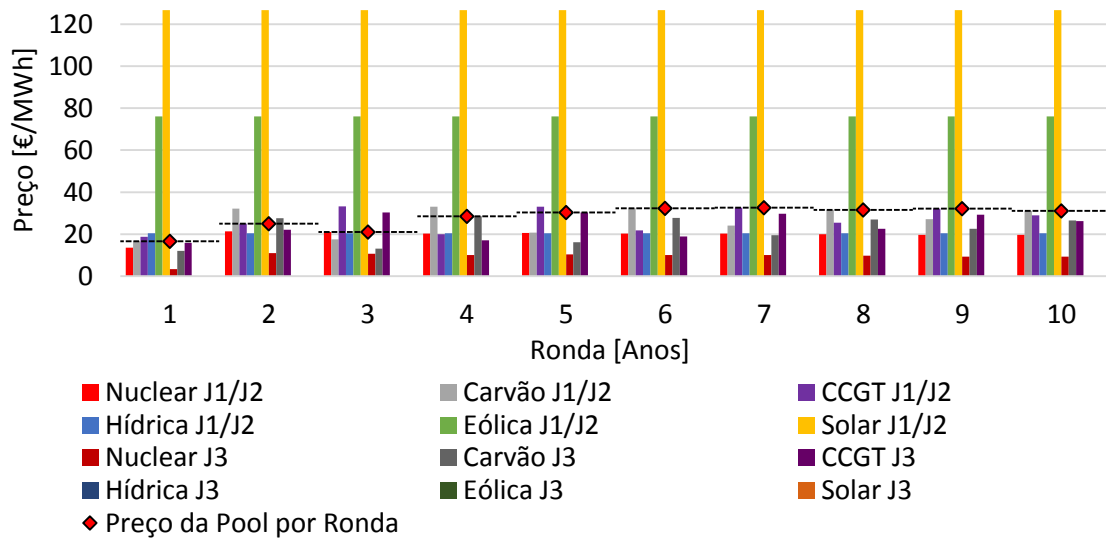


Figura 21 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação Me/Ma.

Nesta figura os preços de oferta do jogador 3 são inferiores na sua maioria em relação aos preços de oferta dos jogadores 1 e 2, sendo que os jogadores 1 e 2 marcam o PP do mercado, aspeto que beneficia o jogador 3. Esta metodologia do jogador 3 produz um maior lucro em relação aos jogadores 1 e 2, como pode ser observado na Figura 22.

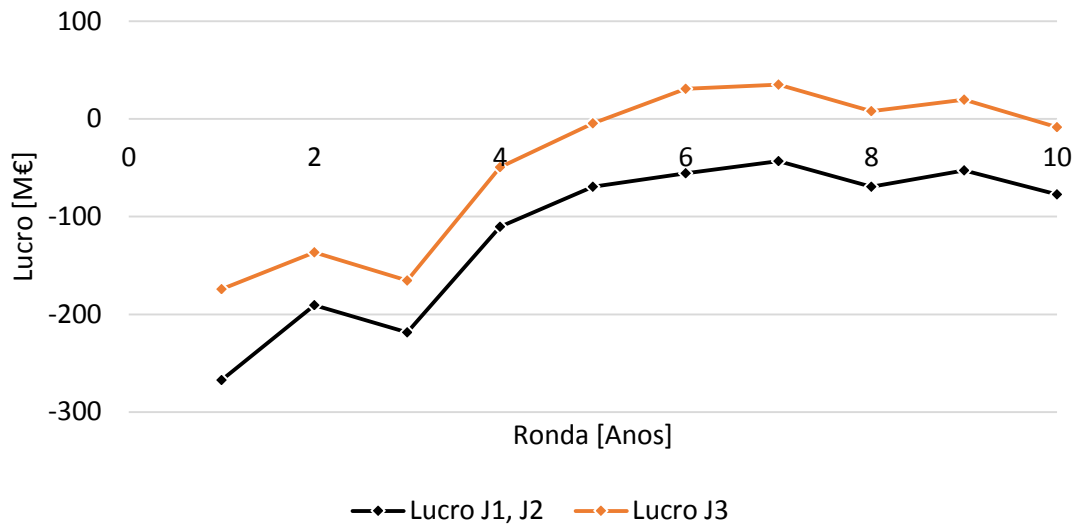


Figura 22 – Lucro obtido pelos 3 jogadores na simulação Me/Ma.

O jogador 3 conseguiu obter um menor prejuízo/maior lucro em relação ao jogador 1 e 2, contudo como se pode observar, o jogador 3 obteve prejuízo na 10ª ronda, ao contrário do que se verificou na simulação Me/Me onde o lucro obtido na 10ª ronda foi de 835,2 M€. O jogador 3 nesta simulação realizou uma decisão de comercialização diferente da decisão tomada na simulação Ma/B, sendo que nesta o jogador 3 optou por se destacar em relação aos jogadores 1 e 2, obtendo maior lucro/menor prejuízo que os seus rivais, abdicando de um maior lucro para tal.

4.4. Análise B/Me

Nesta simulação o jogador 3 diverge da estratégia de *bid-up* para uma estratégia de custos médios, com o mesmo objetivo das análises anteriores, aumentar o lucro obtido e obter um maior lucro em relação aos outros dois jogadores. Ao utilizar a estratégia de custos médios, o jogador 3 pretende que o jogador 1 e 2 marquem o PP, ao mesmo tempo que vende uma maior quantidade de potência em relação aos seus rivais. A Figura 23 demonstra a potência vendida total por cada um dos jogadores desta simulação.

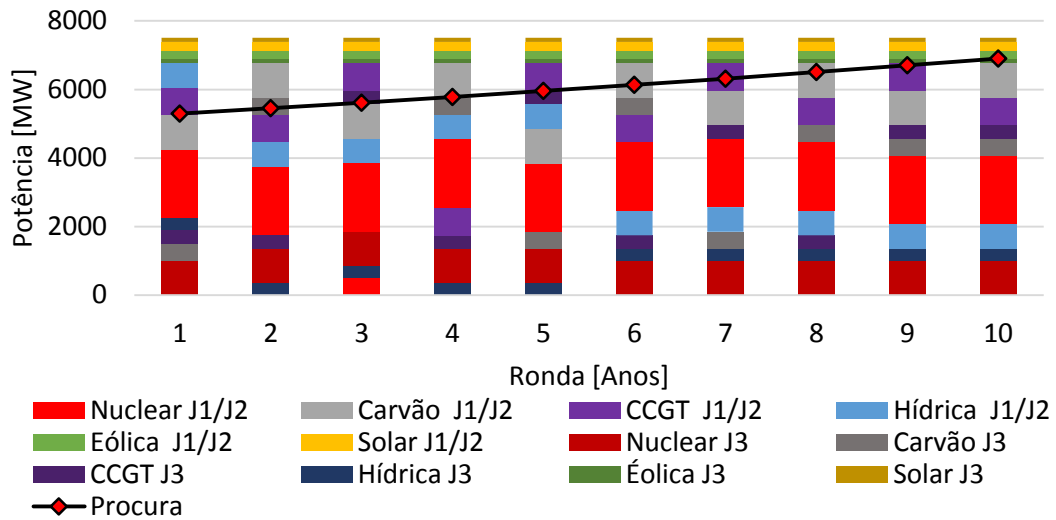


Figura 23 – Potência vendida por central existente no portfólio de cada jogador B/Me.

Nesta figura pode-se observar que nenhum dos 3 jogadores vende em todas as rondas a totalidade da sua potência instalada, sendo que a potência das centrais solares e parte da potência das centrais eólicas nunca casam com a procura do consumidor. Desta forma, a potência vendida pelos 3 jogadores é um fator importante contudo não determinante do lucro que o jogador 3 pode obter em relação aos outros jogadores.

A Figura 24 demonstra a variação de preços das matérias-primas dos 3 jogadores, fator que explica a variação entre potência vendida da central a carvão e a central CCGT.

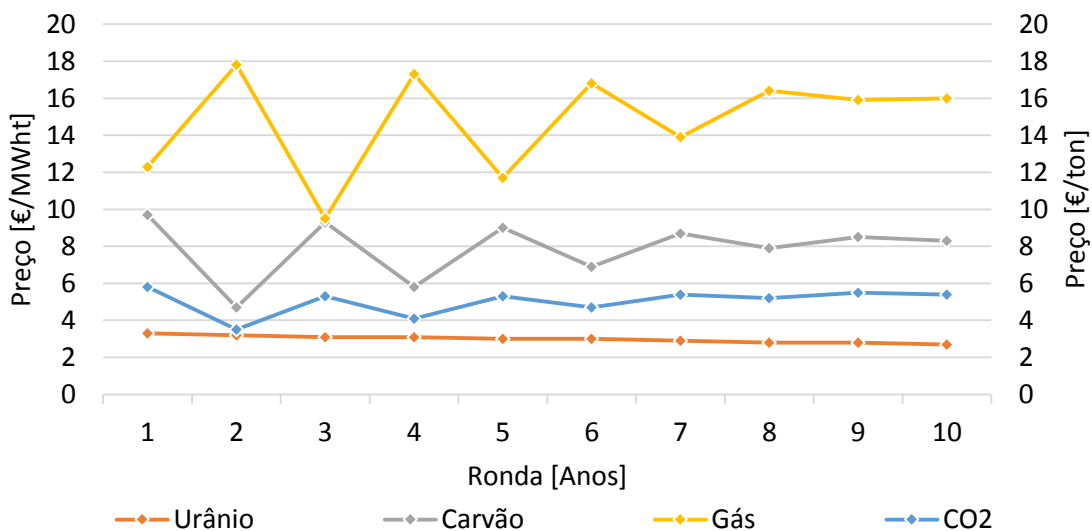


Figura 24 – Variação dos preços das matérias-primas por ronda B/Me.

Como explicado anteriormente, a oscilação dos preços das matérias-primas vai influenciar o preço de oferta de cada uma das centrais, nomeadamente as centrais a carvão e

CCGT, sendo que ao variar o preço do carvão e do gás, associado ao preço de oferta de cada uma destas centrais, a potência vendida das centrais também varia, sendo que numa ronda a central a carvão vende toda a sua potência instalada, e na ronda seguinte, é a central CCGT que vende na sua totalidade a potência instalada. Observando o preço de oferta dos 3 jogadores na Figura 25, pode-se observar que os preços de oferta são elevados, o que por sua vez se vai traduzir num maior lucro para os 3 jogadores, contudo o jogador 3 ao ter preços de oferta sem o valor adicional ϵ de *bid-up*, consegue vender uma maior quantidade de potência em relação ao jogador 1 e 2, enquanto estes marcam o PP maioritariamente.

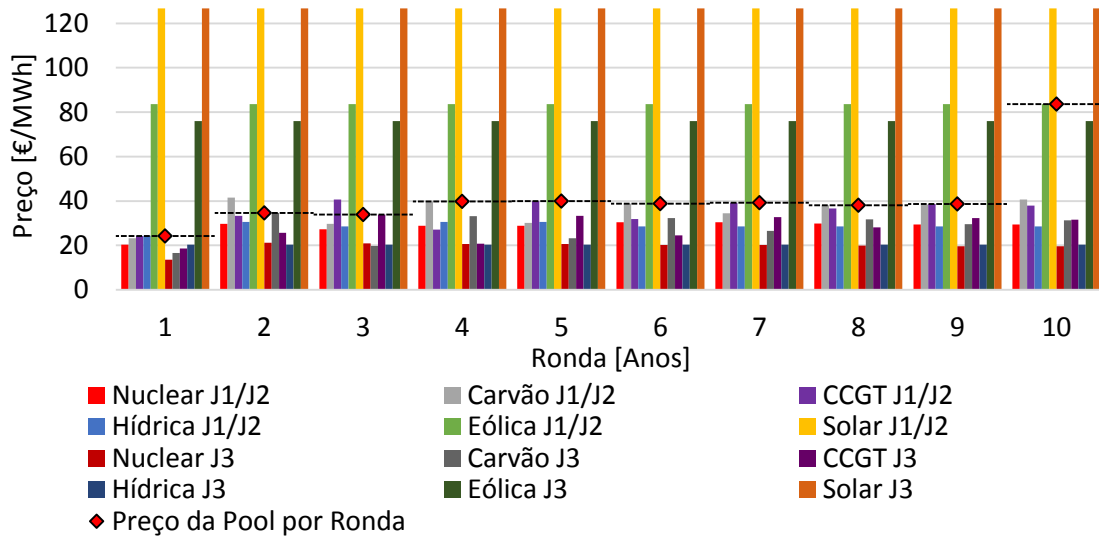


Figura 25 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação B/Me.

Por fim pode-se observar na Figura 26 o lucro obtido pelos 3 jogadores.

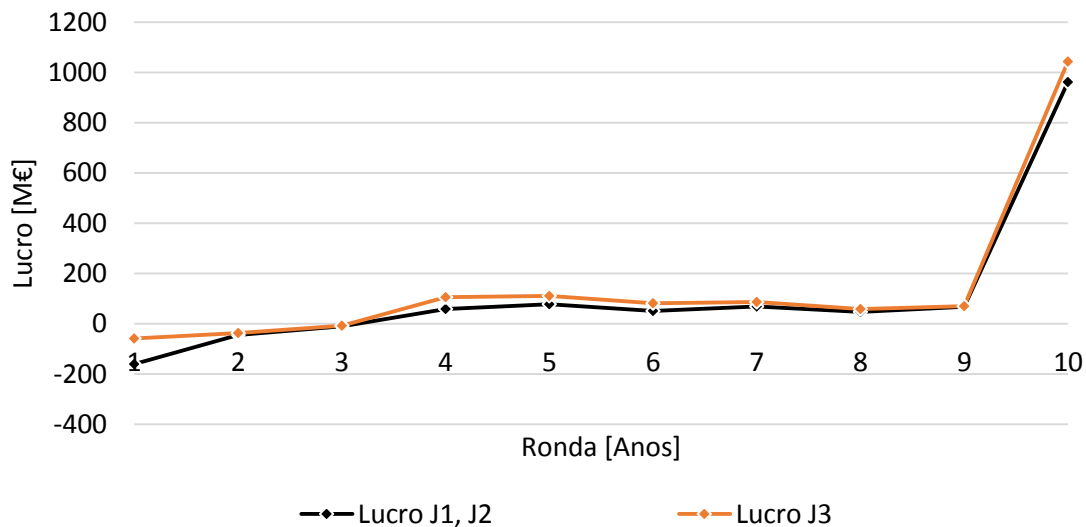


Figura 26 – Lucro obtido pelos 3 jogadores na simulação Me/Ma.

Como se pode observar nesta figura, o jogador 3 conseguiu cumprir os dois objetivos que traçou. Conseguiu obter um lucro superior à situação inicial (988,7 M€ na 10ª ronda da simulação B/B), sendo o lucro obtido nesta simulação da parte do jogador 3 na 10ª ronda de 1042,9 M€. Também conseguiu obter maior lucro em relação ao jogador 1 e 2, que obtiveram um lucro de 961,7 M€, ou seja, o lucro dos jogadores 1 e 2 diminuiu relativamente à situação inicial, o que faz com que o jogador 3 tenha conseguido a situação ideal projetada.

4.5. Análise U/B

Por último, quando os dois jogadores adversários utilizam uma estratégia de *undercut*, o jogador 3 diverge para uma estratégia de *bid-up*.

Observando a Figura 27 relativa à potência vendida pelos 3 jogadores nesta simulação, pode-se observar que o jogador 1 e 2 vendem toda a potência instalada no seu portfólio, enquanto o jogador 3 vende parcialmente a potência instalada no seu, sendo que a potência produzida pelas centrais eólicas e solares nunca casam com a procura do consumidor.

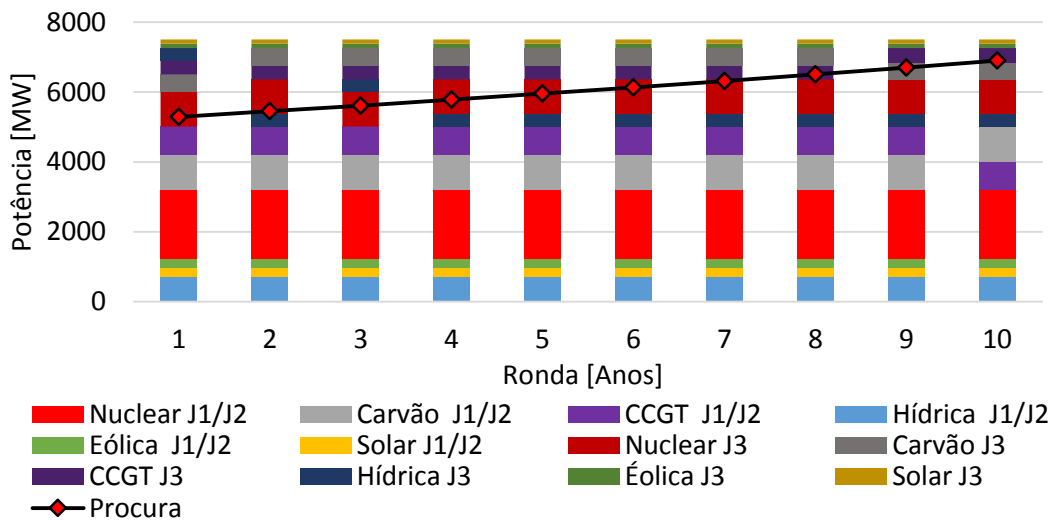


Figura 27 – Potência vendida por central existente no portfólio de cada jogador B/Me.

O jogador 3 ao não vender toda a potência instalada no seu portfólio, associado aos preços de oferta observados na Figura 28, onde o jogador 3 marca o PP, obterá um menor lucro em relação ao jogador 1 e 2, o que não lhe é benéfico em termos de objetivo.

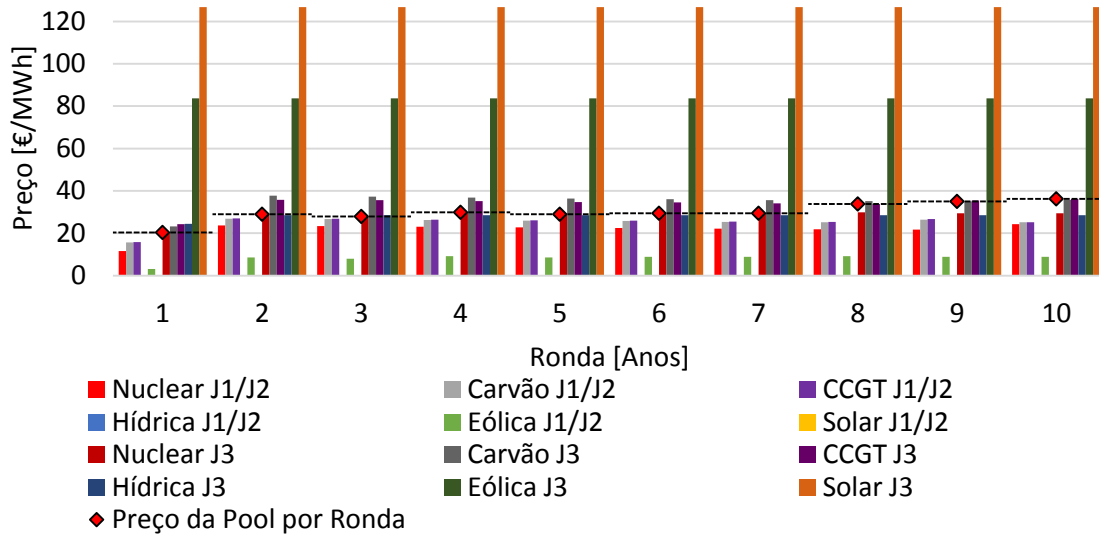


Figura 28 – Preço de oferta de cada central por jogador, associado ao preço de fecho de mercado. Simulação U/B.

Por fim, na Figura 29 pode-se observar que o jogador 3 obteve um menor lucro/menor prejuízo em relação aos outros dois jogadores como foi previsto anteriormente, contudo, o lucro apresentado pelo jogador 3 é maior em relação ao prejuízo apresentado na simulação U/U, sendo que inicialmente obteve um prejuízo de 96,1 M€ na 10ª ronda, e nesta simulação apresentou um lucro de 1,8 M€.

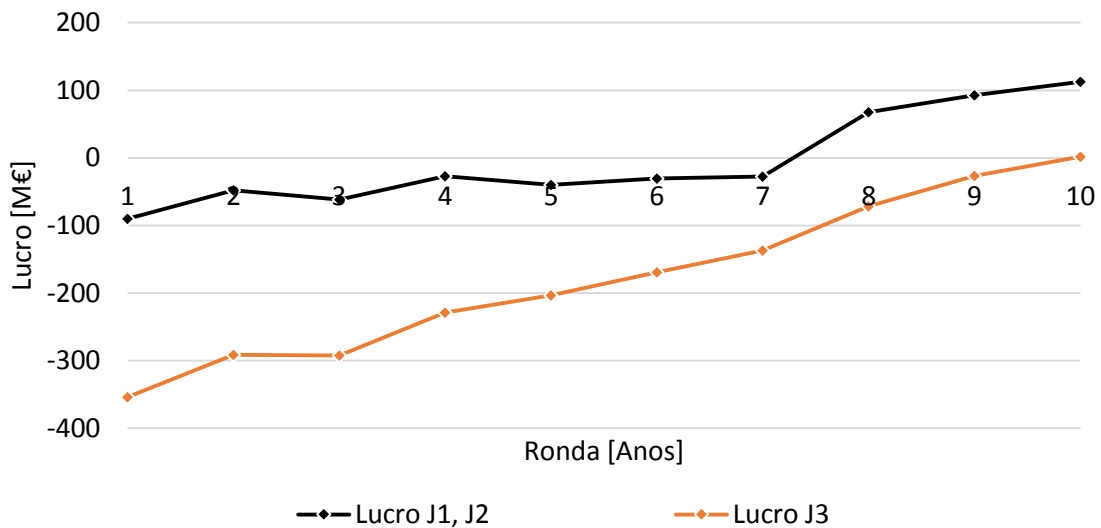


Figura 29 – Lucro obtido pelos 3 jogadores na simulação U/B.

Ou seja, o jogador 3 optou por obter lucro em relação á simulação inicial, sendo que foi possível cumprir parcialmente o objetivo proposto.

4.6. Análise dos equilíbrios de Nash

Os equilíbrios de Nash são importantes para a análise das estratégias e das diferentes combinações existentes entre todas as estratégias, obtendo desta forma a melhor resposta de cada jogador num cenário não-cooperativo.

Para tal foi realizado uma matriz por ronda onde se podem analisar todos os lucros obtidos, de cada uma das estratégias, com o objetivo de encontrar os diversos equilíbrios de Nash existentes.

Na Tabela 8 encontra-se a matriz referente à 1ª ronda de lucros obtidos. Quando a melhor resposta do jogador 1 e 2 se cruza com a melhor resposta do jogador 3, encontra-se o equilíbrio de Nash que se encontra a preto.

Tabela 8 – Matriz de lucros obtidos pelos 3 jogadores. Equilíbrios de Nash referentes à 1ª ronda.

		J3			
		Ma	Me	B	U
J1/J2	Ma	-260.6	-289.9	-354.1	-260.6
		-260.6	-190.8	-90.2	-260.6
	Me	-174.2	-229.2	-280.8	-174.2
		-267.3	-229.2	-134	-267.3
	B	-29.2	-58.1	-142.6	-29.2
		-186.1	-160.6	-142.6	-186.1
	U	-194.3	-289.9	-354.1	-204.8
		-210	-190.8	-90.2	-204.8

Lucro J3
Lucro J1/J2

Pode observar-se que existem dois equilíbrios, quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia de *bid-up*, e a estratégia a utilizar pelo jogador 3 for a estratégia de custos marginais ou *undercut*.

Na 5ª ronda como pode ser observado pela Tabela 9, existem três equilíbrios, sendo quando os jogadores 1 e 2 utilizarem a estratégia de custos marginais e o jogador 3 utilizar a estratégia de *undercut*. Se os jogadores 1 e 2 utilizarem a estratégia de custos médios, o jogador 3 utilizará a estratégia de custos marginais. Por fim, se os jogadores 1 e 2 utilizarem a estratégia de *bid-up*, o jogador 3 utilizará a estratégia de custos médios.

Tabela 9 – Matriz de lucros obtidos pelos 3 jogadores. Equilíbrios de Nash referentes á 5ª ronda.

		J3			
		Ma	Me	B	U
J1/J2	Ma	-310.8	-221.8	-203.2	-92.9
		-310.8	-169.9	-40.1	-52.2
	Me	-4.4	-27.4	-71.4	-4.4
		-69.4	-27.4	0.2	-69.4
	B	1.3	110.6	88.5	1.3
		-105.8	77.5	88.5	-105.8
	U	-52.2	-74.2	-203.2	-65.8
		-72.6	-17.4	-40.1	-65.8

Por fim na Tabela 10, referente à 10ª tabela, existe um único equilíbrio de Nash que ocorre quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia de *bid-up*, e o jogador 3 utilizar a estratégia de custos médios. Este equilíbrio foi demonstrado na análise B/Me no capítulo 7.4, onde se observou que o jogador 3 ao utilizar uma estratégia de custos médios conseguiu cumprir o objetivo estabelecido, obteve um maior lucro do que na situação inicial e ainda conseguiu obter um lucro superior ao jogador 1 e 2.

Tabela 10 – Matriz de lucros obtidos pelos 3 jogadores. Equilíbrios de Nash referentes á 10ª ronda.

		J3			
		Ma	Me	B	U
J1/J2	Ma	-96.1	-82	1.8	-96.1
		-96.1	-0.2	112.6	-96.1
	Me	-8.5	835.2	801.1	-8.5
		-77.2	865.2	852.3	-77.2
	B	134.7	1042.9	988.7	134.7
		49.2	961.7	988.7	49.2
	U	-96.1	-82	1.8	-96.1
		-96.1	-2	112.6	-96.1

4.7. Estudo estratégia EC.1

Foi realizado um estudo de todas as possíveis variações existentes utilizando maioritariamente a estratégia EC.1, sendo que 2 jogadores utilizam consistentemente essa estratégia enquanto o 3º jogador utiliza uma estratégia que poderá ser distinta da dos outros jogadores, contudo esta estratégia será inalterável na duração do jogo.

Na Figura 30, onde se observam as 4 estratégias assumidas pelo jogador 3, constata-se que não existe um claro domínio de uma estratégia em relação às outras, sendo que consoante a variação de preços das matérias-primas e do crescimento da procura, existem rondas em que determinadas estratégias são mais benéficas do que outras.

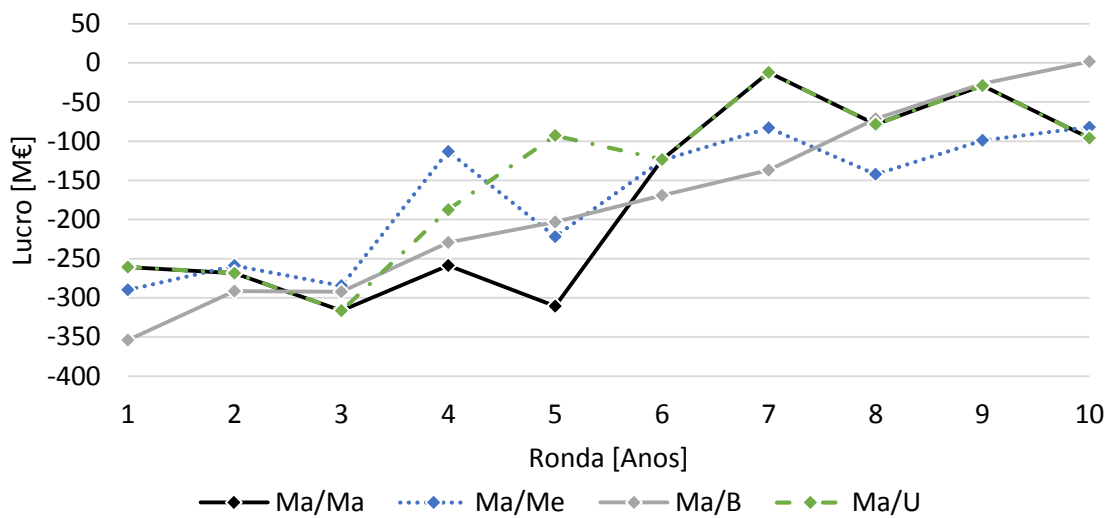


Figura 30 – Lucro obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.1.

Pode-se observar que na ronda 4, a estratégia de custos médios obteve um menor prejuízo em relação às restantes estratégias, e na 5ª ronda a estratégia de *undercut* produziu o mesmo efeito. Na 10ª ronda, a única estratégia que obteve lucro neste estudo, foi a estratégia de *bid-up*, que obteve um lucro de 1,8 M€. Ou seja, consoante a estratégia imposta pelo jogador 3, em resposta à estratégia de custos marginais do jogador 1 e 2, o resultado varia de acordo com as variáveis de mercado existentes, sendo essas variáveis os preços das matérias-primas e a procura. Porém, um fator que é predominante e que tem em consideração as variáveis mencionadas, é o PP estabelecido por cada uma das estratégias e potência vendida, sendo que estes dois fatores determinam o valor €/Mwh que cada produtor de energia receberá. Na Figura 31 e na Figura 32 pode-se observar o PP relativos às 10 rondas e a potência vendida do jogador 3

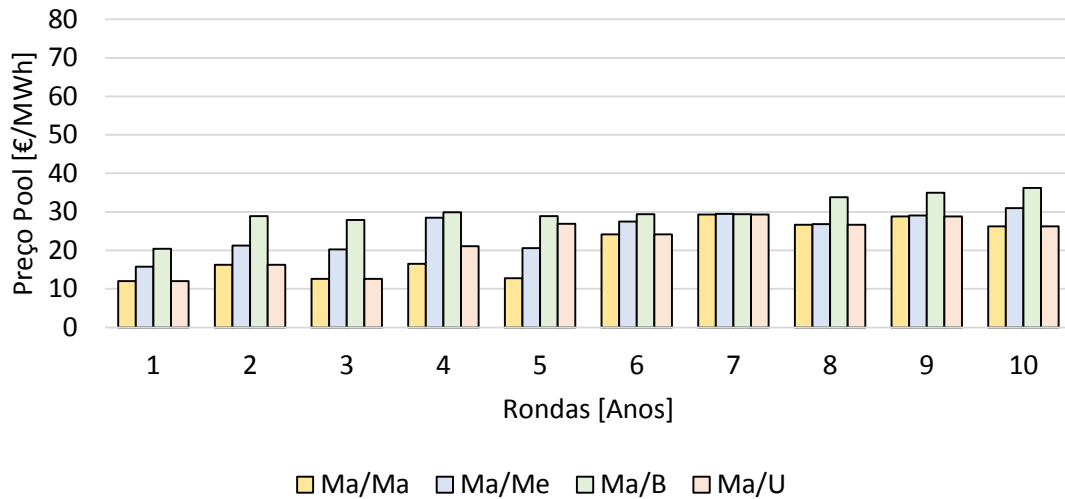


Figura 31 – PP obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.1.

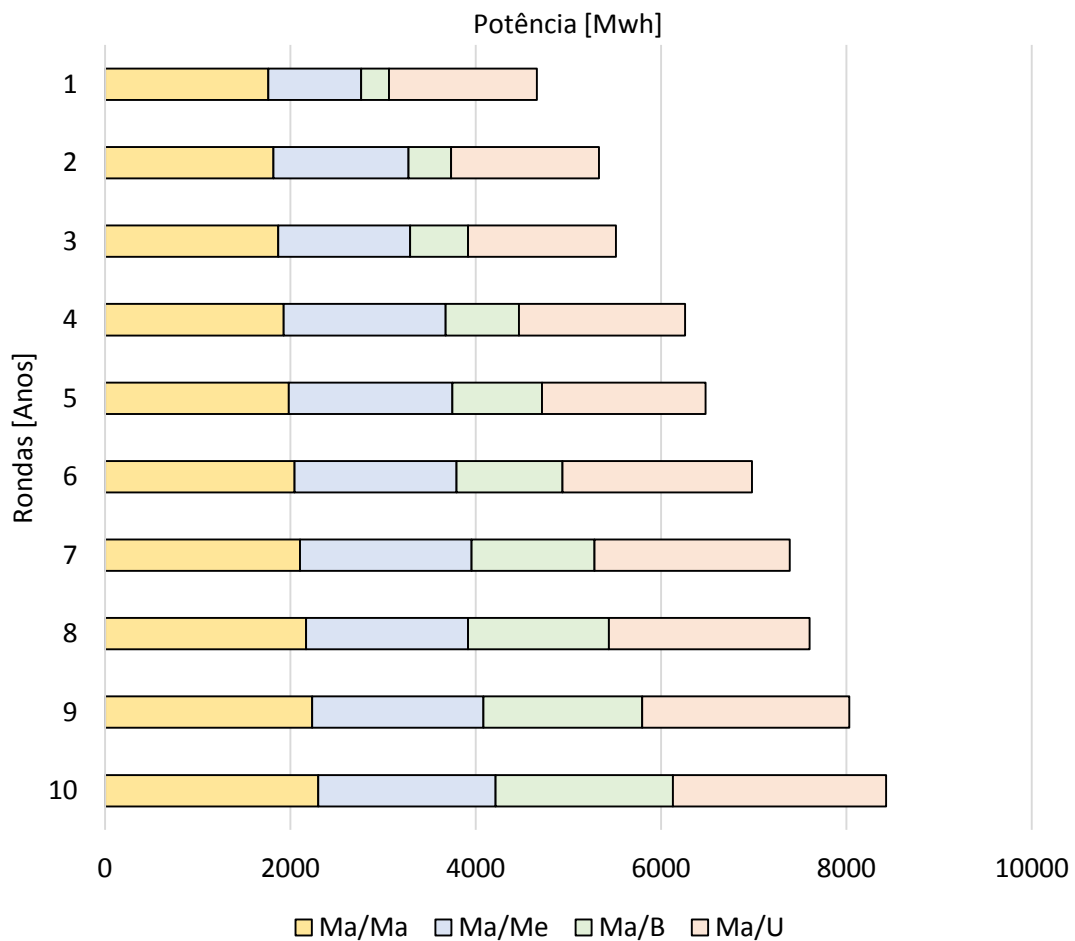


Figura 32 – Potência vendida pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.1.

Nas rondas iniciais, em que a procura é baixa, podem-se verificar preços de pool mais baixos e uma menor potência vendida, o que se deve a uma menor procura, associada às estratégias utilizadas. Contudo, à medida que a procura aumenta, o PP e a potência vendida aumentam conseqüentemente, o que permite uma redução do prejuízo obtido por cada uma destas empresas. Também se pode observar que a estratégia de *bid-up* marca o maior PP comparativamente a outras estratégias, mas ao mesmo tempo tem a menor quantidade de potência vendida, sendo que a relevância desta estratégia aumenta consoante a procura, pois na 10ª ronda a potência vendida é semelhante à potência vendida de outras estratégias, pelo que foi a única estratégia capaz de produzir lucro neste estudo.

Em sentido inverso, a estratégia de custos marginais marca um PP menor comparativamente a outras estratégias. Contudo, consegue ter uma maior quantidade de potência vendida inicialmente, o que lhe permite obter um menor prejuízo, como observado na 1ª ronda.

4.8. Estudo estratégia EC.2

Neste estudo os jogadores 1 e 2 utilizaram a estratégia EC.2, onde o preço de oferta é igual aos custos médios de cada uma das centrais. O 3º jogador utiliza uma estratégia que poderá ser distinta à dos outros jogadores, contudo esta estratégia será inalterável na duração do jogo. Abaixo pode-se observar a Figura 33, referente aos lucros obtidos pelo jogador 3 utilizando todas as estratégias disponíveis.

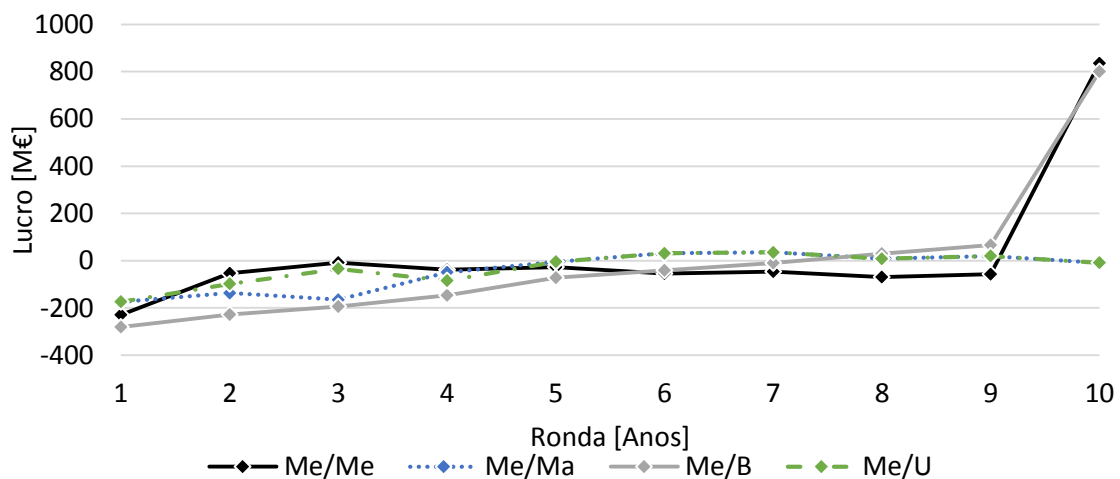


Figura 33 – Lucro obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.2.

O primeiro aspeto a salientar é o do jogador 3 na 10ª ronda conseguir obter lucro utilizando unicamente as estratégias de custos médios e de *bid-up*, pelo que as estratégias de custos marginais e de *undercut* não são ideias nesta situação.

Observando a Figura 34 e Figura 35, pode-se determinar a razão pela qual tanto a estratégia de custos médios como a estratégia de *bid-up* são mais benéficas em relação às outras estratégias.

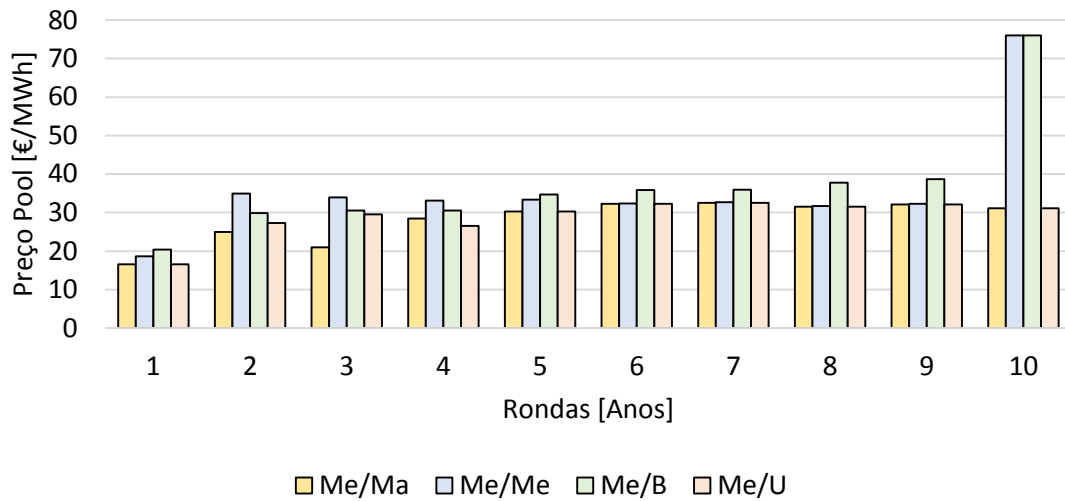


Figura 34 – PP obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.2.

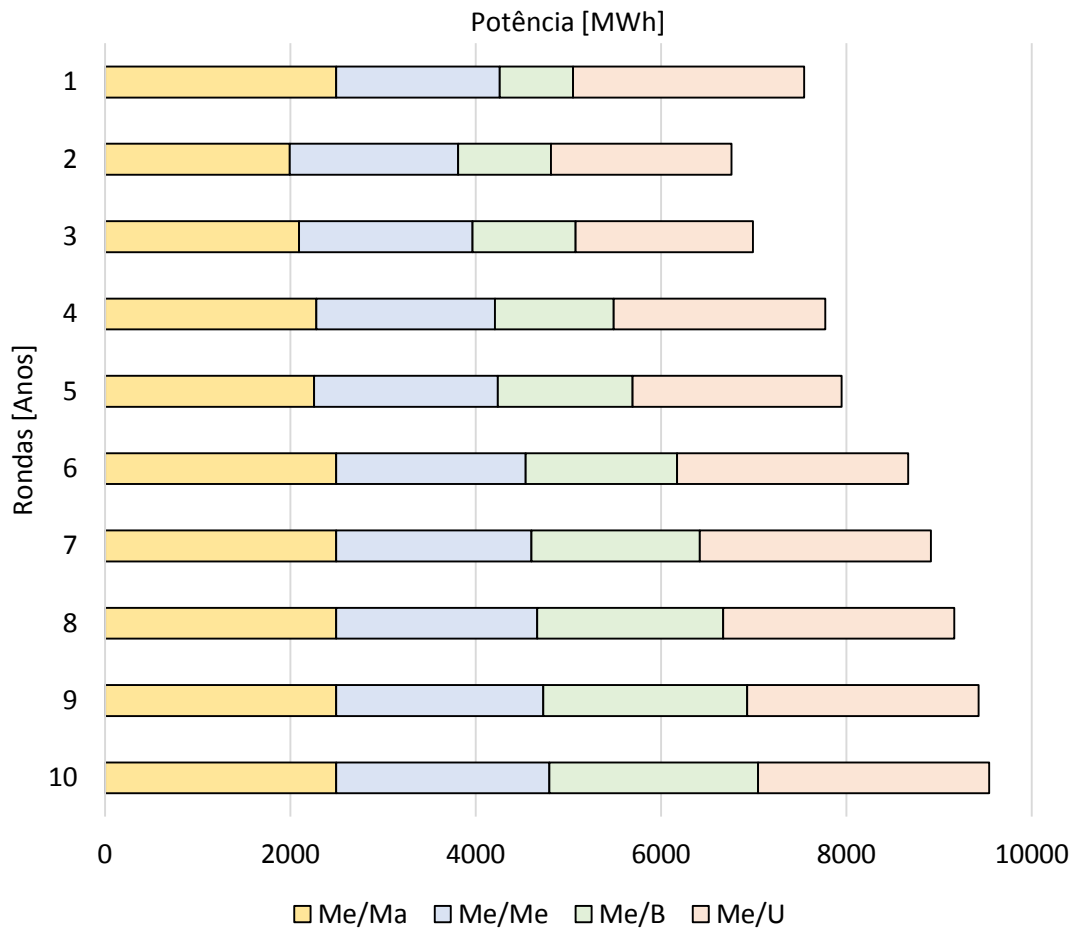


Figura 35 - Potência vendida pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.2.

Embora haja uma maior potência vendida em todas as rondas da parte das estratégias de custos marginais e de *undercut*, estas também apresentam o menor PP, sendo que na 10ª ronda, o PP de 31,1 €/MWh, não é suficiente para gerar receitas elevadas, o que associado aos custos médios das centrais, que é semelhante para todas as estratégias, vai fazer com que ambas as estratégias não gerem o lucro esperado.

Já as estratégias de custos médios e de *bid-up* geram o maior lucro na 10ª ronda. Ao marcarem um PP elevado, a diferença de lucro entre as duas estratégias pode ser explicado devido ao volume de energia vendida por ambas. A estratégia de custos médios vendeu uma maior quantidade de potência em relação à estratégia de *bid-up*, pois na 10ª ronda o jogador 3 marcou o PP juntamente com os outros 2 jogadores em relação à sua central eólica, gerando maior lucro em relação à estratégia de *bid-up*, que na 10ª ronda não vendeu potência da sua central eólica. Este aspecto pode ser visto através da Figura 36 e Figura 37.

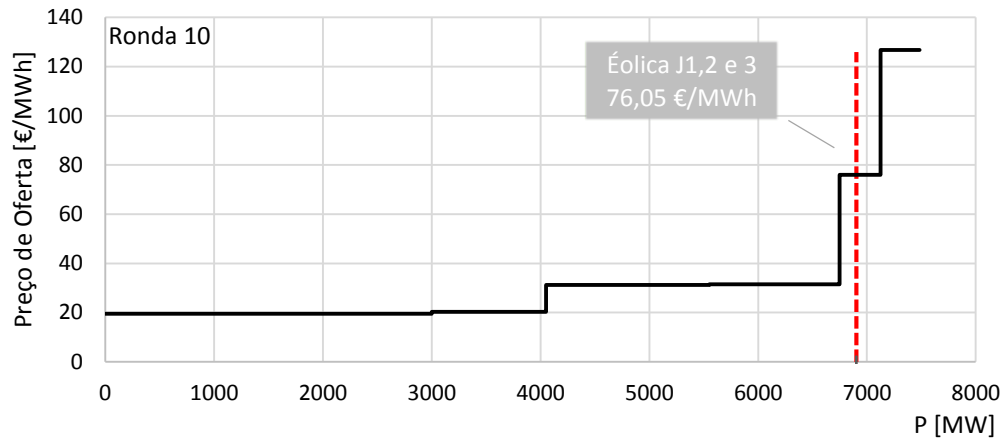


Figura 36 – Curva de preços de oferta de todos os jogadores na 10ª ronda com o jogador 3 a utilizar a estratégia de custos médios.

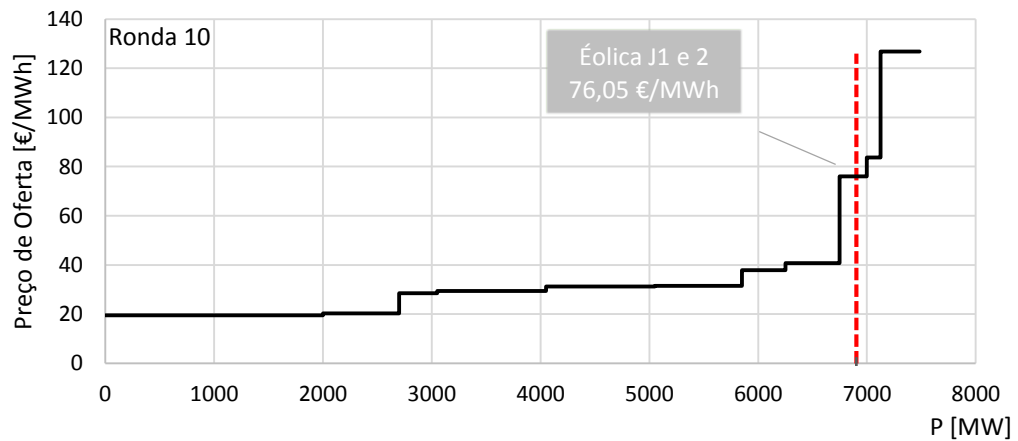


Figura 37 – Curva de preços de oferta de todos os jogadores na 10ª ronda com o jogador 3 a utilizar a estratégia de *bid-up*.

4.9. Estudo estratégia EC.3

Neste estudo foram utilizadas todas as possíveis variações existentes utilizando maioritariamente a estratégia EC.3, sendo que 2 jogadores utilizam consistentemente essa estratégia enquanto o 3º jogador utiliza uma estratégia que poderá ser distinta da dos outros jogadores, contudo esta estratégia será inalterável na duração do jogo.

Pode-se observar através da Figura 38, que as diferentes curvas de lucro obtidas são semelhantes às curvas obtidas com a estratégia EC.2.

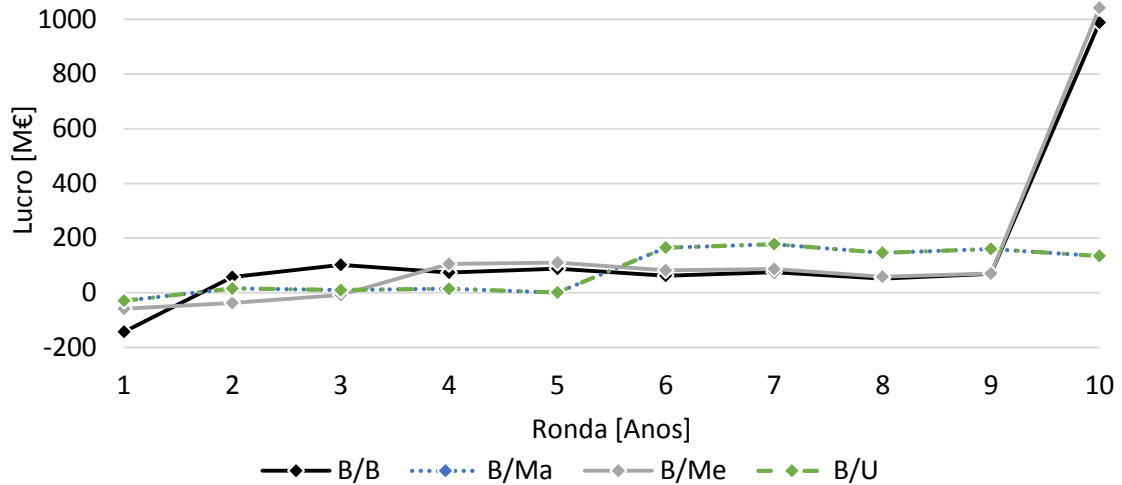


Figura 38 – Lucro obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.3.

Contudo, existe uma diferença importante, pois as estratégias de custo marginal e de *undercut* geram lucro a partir da 6ª ronda. Isto ocorre devido aos jogadores 1 e 2 marcarem PP mais elevados, marcando preço para os outros jogadores como observado na Figura 39, o que por sua vez faz com que as receitas obtidas pelos jogadores que utilizaram estratégias de menor risco, seja maior.

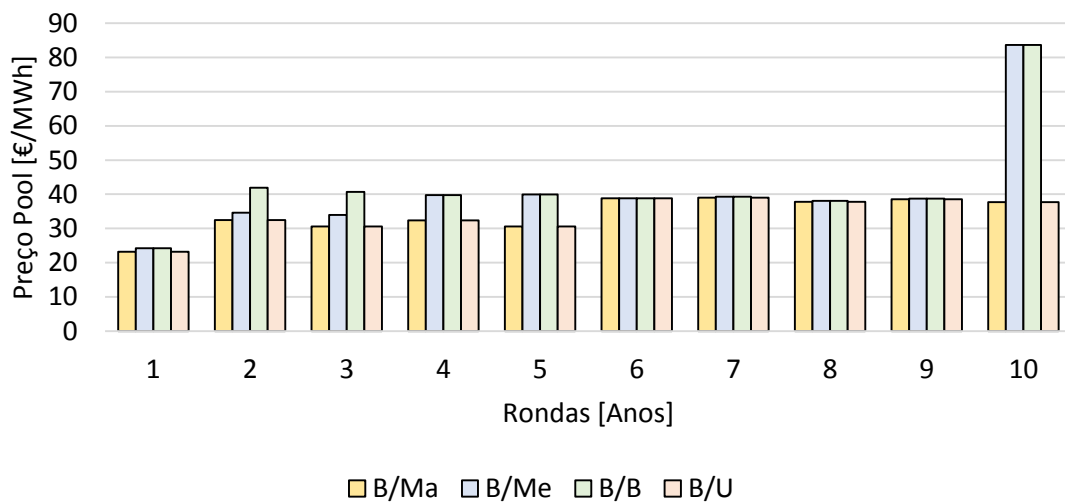


Figura 39 – PP obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.3.

Ou seja, ao associar um PP mais elevado a uma potência vendida semelhante à estratégia EC.2, Figura 40, vai ser gerado um maior lucro comparativamente a essa estratégia.

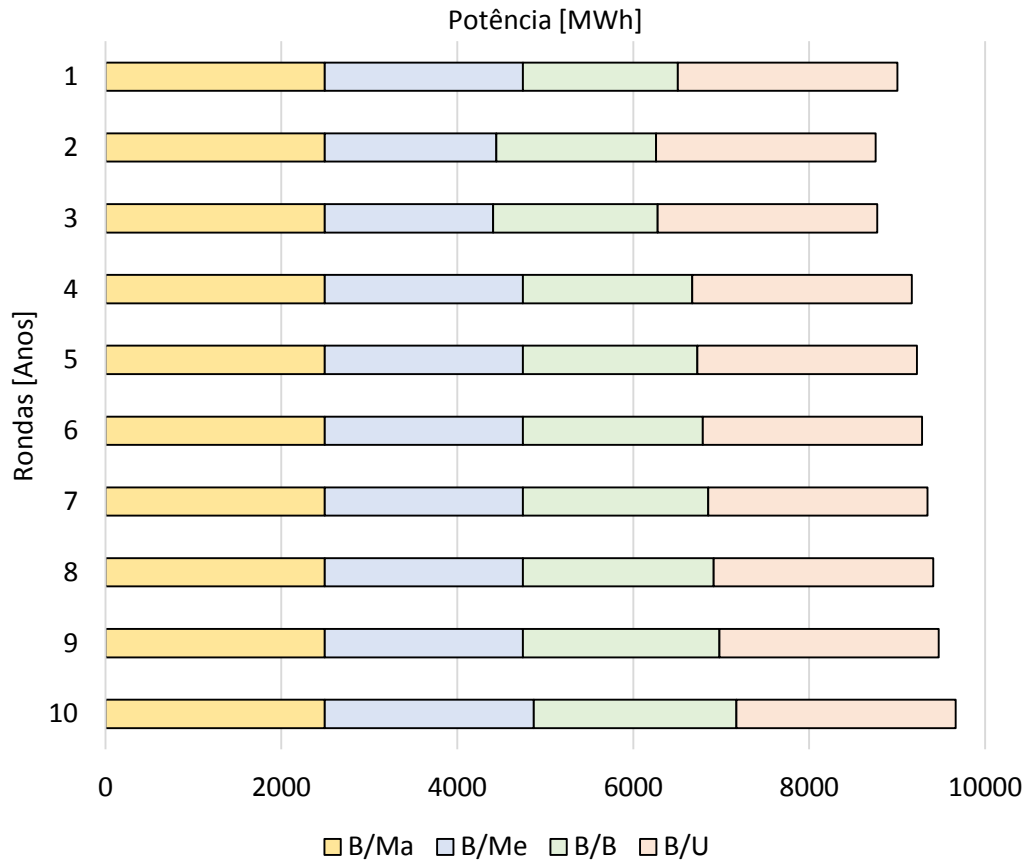


Figura 40 – Potência vendida pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.3.

Também se pode observar que na 10ª ronda a estratégia que gerou um maior lucro foi a estratégia de *bid-up*, com uma justificação semelhante ao estudo EC.2, sendo que os 3 jogadores ao utilizarem a mesma estratégia dividiram a potência da central eólica, enquanto no caso do cenário em que o jogador utiliza custos médios grande parte da potência produzida pela central eólica não casou com a procura do consumidor, gerando portanto um menor lucro. Isto pode ser observado abaixo, pela Figura 41 e Figura 42.

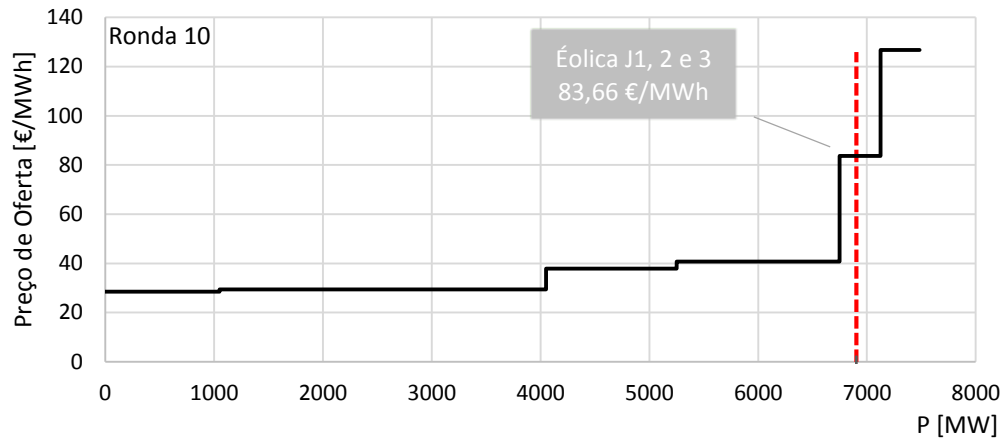


Figura 41 – Curva de preços de oferta de todos os jogadores na 10ª ronda com o jogador 3 a utilizar a estratégia de *bid-up*.

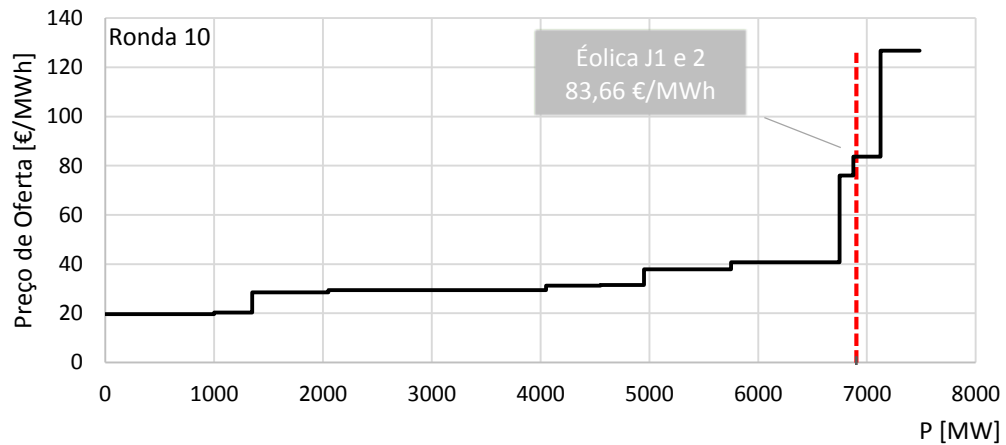


Figura 42 – Curva de preços de oferta de todos os jogadores na 10ª ronda com o jogador 3 a utilizar a estratégia de custos médios.

4.10. Estudo estratégia EC.4

Por último, foram analisadas todas as simulações em que os jogadores 1 e 2 utilizaram a estratégia de *undercut*, enquanto o 3º jogador utiliza uma estratégia que poderá ser distinta à dos outros jogadores, contudo esta estratégia será inalterável na duração do jogo.

Pode-se observar desde logo, através da Figura 43, que só existiu uma estratégia capaz de gerar lucro na 10ª ronda, sendo a estratégia utilizada a de *bid-up*.

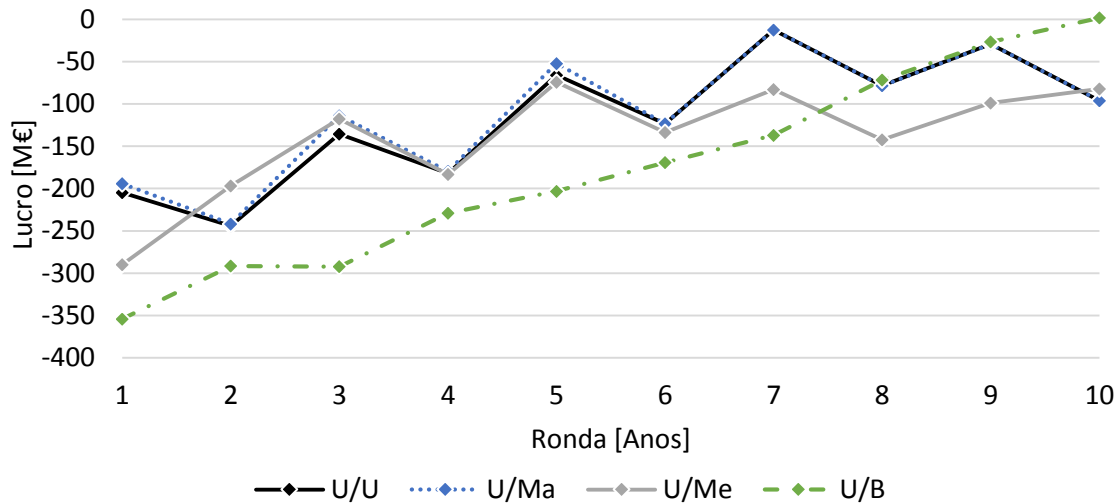


Figura 43 – Lucro obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.3.

As restantes estratégias obtiveram prejuízo em todas as rondas da simulação, pelo que estes resultados assemelham-se aos obtidos na análise da estratégia EC.1. Contudo as estratégias de custos marginais, *undercut* e custos médios obtêm um prejuízo semelhante até a ronda 5, sendo que a partir dessa ronda, a estratégia de custos médios obtêm um maior prejuízo do que as outras duas estratégias até à ronda 10. Nesta ronda a estratégia de custos médios tem um menor prejuízo enquanto as estratégias de custos marginais e *undercut* aumentam o prejuízo obtido.

Observando a Figura 44 e Figura 45, a justificação para esta situação encontra-se na potência vendida.

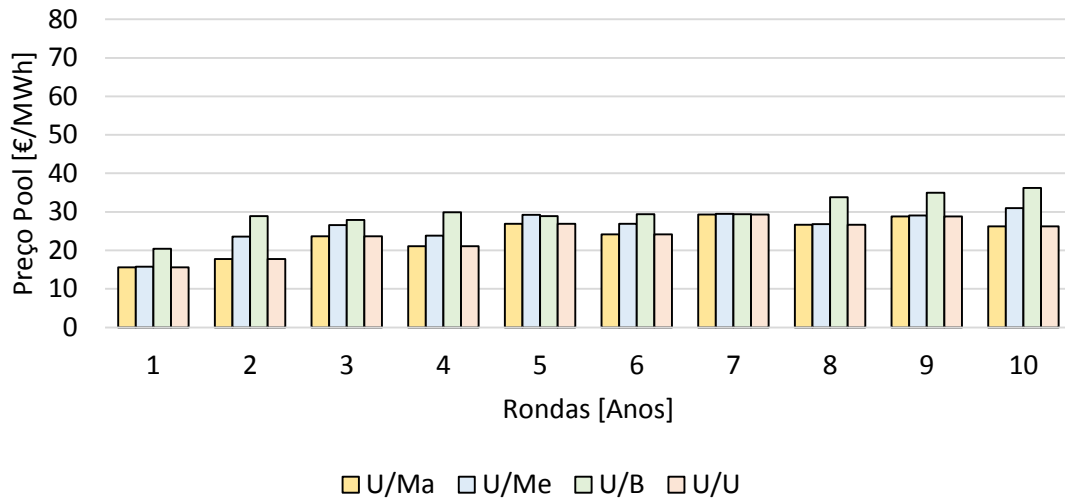


Figura 44 – PP obtido pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.4.

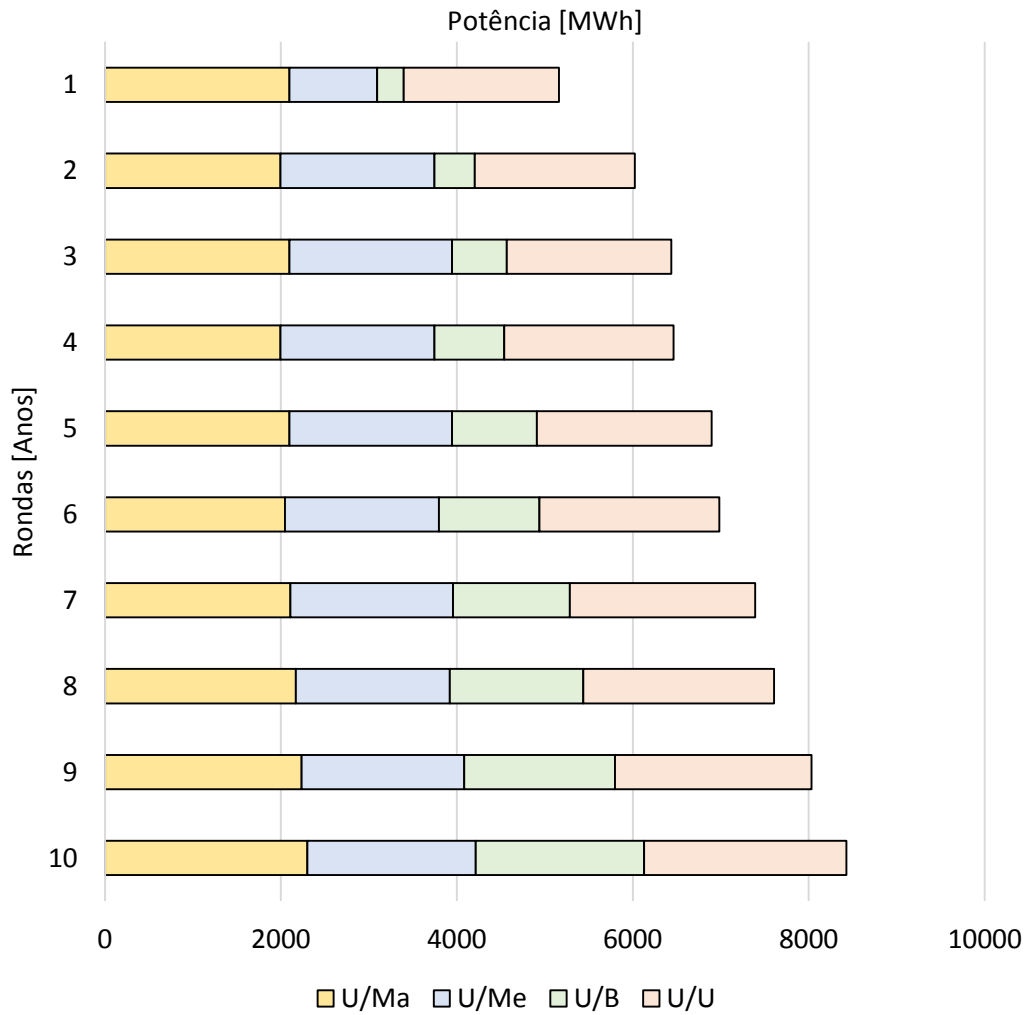


Figura 45 – Potência vendida pelo jogador 3, utilizando todas as estratégias disponíveis quando os jogadores 1 e 2 utilizam a estratégia EC.4.

Enquanto as estratégias de custo marginal e de *bid-up* aumentam a potência vendida durante a simulação, o jogador 3 ao utilizar a estratégia de custos médios oscila entre valores maiores e menores de potência vendida, pelo que não consegue gerar uma receita maior que os outros dois jogadores. Contudo, pode-se observar que na ronda 10, o PP do jogador 3 ao utilizar a estratégia de custos médios é maior do que as outras duas estratégias, o que faz com que o mesmo com uma potência vendida menor, consiga obter um menor prejuízo do que utilizando as outras estratégias.

Capítulo 5

Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as conclusões obtidas através do estudo de cada estratégia realizada, e como estas podem influenciar o mercado e todas as suas variáveis. Apresentam-se objetivos futuros para que haja um desenvolvimento contínuo de estratégias de comercialização otimizadas

5. Conclusões

Foi analisado o mercado de forma a obter uma maior compreensão e uma maior noção do mesmo, para que as empresas geradoras possam otimizar as suas estratégias consoante momentos determinantes do mercado.

Foram analisadas 4 estratégias, onde as estratégias de custos marginais e de *undercut* acarretam um menor risco para as empresas geradoras, contudo, a obtenção de lucro utilizando estas estratégias estaria dependente de estratégias rivais. Isto foi observado nas diversas simulações realizadas, onde as estratégias de menor risco obtiveram prejuízo quando emparelhadas com estratégias de cariz semelhante da parte de outras empresas rivais. Só quando foram emparelhadas com estratégias que acarretavam um maior risco é que estas estratégias obtiveram lucro, sendo até superior ao lucro obtido pelas empresas rivais. Ou seja, existem claras vantagens e desvantagens ao utilizar as estratégias de custos marginais e *undercut*.

Vantagens:

- Não existe um risco inerente elevado;
- Obtenção de lucro quando emparelhadas com estratégias de maior risco.

Desvantagens:

- Maior dependência de estratégias rivais;
- Incapacidade de cobrir os custos médios de cada central.

Em relação às estratégias restantes, a estratégia de custos médios é uma estratégia de risco médio, pois cobre os custos fixos e os custos marginais de cada uma das centrais da empresa, enquanto a estratégia de maior risco, a estratégia de *bid-up*, foi capaz de produzir o maior lucro se todos os jogadores utilizassem uma estratégia semelhante. Porém, quando emparelhada com as estratégias de custos marginais e *undercut*, a estratégia de *bid-up* marcava o PP para as outras empresas, pelo que existe uma decisão que tem de ser ponderada. A empresa tem de decidir se aumenta o seu lucro, aumentando consequentemente o lucro das empresas rivais acima do seu (o que faz com que não cumpra o objetivo principal de ganhar o jogo), ou utiliza uma estratégia de menor risco, obtendo um lucro menor, mas afundando o PP, o que por sua vez se traduziria num menor lucro para as empresas rivais.

Pode observar-se que não existe uma estratégia dominante que garanta melhores resultados que todas as outras, o que encaixa na realidade do mercado elétrico liberalizado, sendo

que existem períodos em que as empresas marcam um PP elevado, logo todas as empresas obtêm lucro, e existem outros períodos que são marcados por PP baixos, que se traduzem em prejuízos para as empresas.

Logo é importante o estudo do mercado de ronda a ronda, procurando a melhor resposta tendo em conta todas as variáveis existentes no mercado e no simulador utilizado. Através dos equilíbrios de Nash, foi possível fazer um estudo de quais os equilíbrios existentes no mercado por ronda, se os 3 jogadores utilizarem todas as estratégias disponíveis. O primeiro aspeto que se pode observar é que existem diversos equilíbrios distintos nas 10 rondas, ou seja, dependendo dos valores tomados pelas variáveis do mercado, os equilíbrios obtidos utilizando as estratégias criadas são diferentes, pelo que se pode concluir que ao fazer este estudo de mercado é necessário não ter em consideração só as estratégias utilizadas pelas empresas rivais, mas sim todas as variáveis existentes nesse ambiente (preço das matérias-primas, quantidade de energia oferecida e vendida, a procura do consumidor, os custos das centrais, as emissões de CO², entre outras).

Considerando que o jogador que obteve maior lucro na 10^a ronda é o vencedor, então foi encontrado um equilíbrio nessa situação, onde o jogador 1 e 2 utilizaram a estratégia de *bid-up*, e o jogador 3 utilizou a estratégia de custos médios, o que lhe permitiu obter um maior lucro em relação aos outros jogadores, vencendo o jogo.

Desta forma foi possível estudar o mercado e todas as suas variáveis, tendo em consideração estratégias com graus de risco diferentes. Isto permitiu uma análise mais profunda do mercado elétrico, e da obtenção de uma melhor resposta correspondente a um leque abrangente de cenários que ocorrem no mercado elétrico liberalizado.

Pretende-se no futuro a criação de uma estratégia otimizada, que vá analisar os padrões de mercado existentes, sendo que para tal vai utilizar os equilíbrios de Nash obtidos, criando assim uma estratégia com o objetivo de obter o maior lucro possível. Ou seja, em termos práticos, o jogador consegue obter uma leitura detalhada do mercado e das suas variáveis, utilizando essa informação para tomar uma decisão de comercialização baseada nas análises realizadas nesta dissertação.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

Neste capítulo apresentam-se as referências bibliográficas utilizadas durante a dissertação e que serviram de base para o estudo e uma maior compreensão do tema a ser apresentado.

6. Referências bibliográficas

- [1] “www.ren.pt,” REN, 2014. [Online]. Available: https://www.ren.pt/o_que_fazemos/eletricidade/o_setor_eletrico/. [Acedido em 04 2014].
- [2] E. W. Group, “Uranium Resources and Nuclear Energy,” *EWG-Series*, nº 1, 12 2006.
- [3] B. L. Cohen, “www.umich.edu,” University of Michigan, 2005. [Online]. Available: <http://www.umich.edu/~radinfo/introduction/np-risk.htm>. [Acedido em 04 2014].
- [4] REN21, “Global Status Report,” UNEP, Paris, 2013.
- [5] M. Zarezadeh, “Electricity price forecasting in Iranian electricity market applying Artificial Neural Networks,” *Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada*, vol. 4563, pp. 1-6, 2008.
- [6] *Kyoto Protocol to the United Nations Framework*, 1998.
- [7] P. Joskow, “Lessons Learned From Electricity Market Liberalization.,” *Energy Journal*, pp. 9-42, 2008.
- [8] D. V. Rotaru, “CESWP,” 2010. [Online]. Available: http://ceswp.uaic.ro/articles/CESWP2013_V2_ROT.pdf. [Acedido em 04 2014].
- [9] “www.erse.pt,” ERSE, 2009. [Online]. Available: <http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/mercadoeelectricidade/Paginas/default.aspx>. [Acedido em 04 2014].
- [10] “Energy-UK,” ENERGYUK, 2014. [Online]. Available: <http://www.energy-uk.org.uk/energy-industry/the-energy-market.html>. [Acedido em 07 2014].
- [11] “APX power spot exchange,” APX power UK, 2014. [Online]. Available: <http://www.apxgroup.com/trading-clearing/apx-power-uk/>. [Acedido em 07 2014].
- [12] “ofgem,” ofgem, 2014. [Online]. Available: <https://www.ofgem.gov.uk/about-us/how-we-work>. [Acedido em 2014].
- [13] “Agora Energiewende,” Agora Energiewende, 2014. [Online]. Available: <http://www.agora-energiewende.org/topics/electricity-market-and-system-reliability/how-does-germanys-electricity-market-work/>. [Acedido em 07 2014].

- [14] “EPEX,” EPEX, 2014. [Online]. Available: <http://www.epexspot.com/en/company-info>. [Acedido em 2014].
- [15] F. Geneose, M. Geneose e M. Wietschel, “Occurrence of negative prices on the German spot market for electricity and their influence on balancing power markets,” em *7th International Conference on the European Energy Market, EEM 2010*, 2010.
- [16] “Powernext,” Powernext S.A, 2009. [Online]. Available: http://www.powernext.com/#sk;tp=app;n=page;f=getPage;t=page;fp=system_name:Company_Profile;lang=en_US;m=Powernext_Group. [Acedido em 07 2014].
- [17] D. López e J. Juan, “Analysis of French Electric Market using Heteroscedastic Models of Time Series,” em *2008 5th International Conference on the European Electricity Market, EEM*, 2008.
- [18] “NordPool,” 2014. [Online]. Available: http://www.nordpoolspot.com/Global/Download%20Center/Annual-report/Nord-Pool-Spot_Europe's-leading-power-markets.pdf. [Acedido em 07 2014].
- [19] “NordPool,” 2014. [Online]. Available: <http://www.nordpoolspot.com/Global/Download%20Center/Rules-and-regulations/The-Nordic-Electricity-Exchange-and-the-Nordic-model-for-a-liberalized-electricity-market.pdf>. [Acedido em 7 2014].
- [20] *Decreto-Lei n.º 182/95*, 1995, pp. 4772-4783.
- [21] “EDP serviço universal,” EDP, 2009. [Online]. Available: <http://www.edpsu.pt/pt/CUR/EDP%20Images/graficoOrganizacaoMercado.png>. [Acedido em 07 2014].
- [22] “www.erse.pt,” ERSE, 2009. [Online]. Available: <http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/Paginas/default.aspx>. [Acedido em 04 2014].
- [23] *Decreto Lei n.º29/2006*, 2006, pp. 1189-1203.
- [24] “www.mibel.com,” MIBEL, 2012. [Online]. Available: <http://www.mibel.com/index.php?mod=pags&mem=detalle&relmenu=40&relcategoria=101&idpag=28&lang=pt>. [Acedido em 04 2014].

- [25] M. Hasani-Marzooni e S. H. Hosseini, “Short-term market power assessment in a long-term dynamic modeling of capacity investment,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, n° 2, pp. 626-638, 2013.
- [26] S.-K. Kim, J.-H. Park, H.-C. Lee, G.-P. Park, S.-S. Lee, W. Kim e Y.-T. Yoon, “Economic evaluation for generation investment in South Korea electricity market,” *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2009.
- [27] X. He, V. Pignon e X. Poupart, “Do energy markets provide adequate incentives for investment in generating capacity?—A case study in Nordic electricity market,” *2009 6th International Conference on the European Energy Market (2009)*, 2009.
- [28] X. L. Y. Li, “Power Supplier ’ s Risk Types and Optimal Asset Management Reckon in Biding Failure,” *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*, pp. 557-560, 2008.
- [29] T. S. X. Ma, “Credibility theory based approach to build optimal bidding strategies with risk management for generation companies,” *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1-5, 2008.
- [30] H. Haghghat, H. Seifi e A. Kian, “Pay-as-bid versus marginal pricing: The role of suppliers strategic behavior,” em *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012.
- [31] D. X. G. G. W. You, “Study on Bidding Strategies of Power Suppliers with Asymmetric Generation Capacity,” *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-4, 2010.
- [32] Z. W. X. Huang, “Analysis of Bidding Strategies of Generation Companies by Evolutionary Game Theory,” *2009 Second International Conference on Information and Computing Science*, n° 3, pp. 62-65, 2009.
- [33] M. Dufwenberg, “Game Theory,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, vol. 2, pp. 167-173, 2011.
- [34] A. Street, L. Freire e J. Contreras, “Sharing quotas of a renewable energy hedge pool: A cooperative game theory approach,” *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, pp. 1-6, 2011.
- [35] P. D. Straffin, *Game Theory and Strategy*, Washington: The Mathematical Association of America, 1993.

- [36] K.-S. Hwang, J.-Y. Chiou e T.-Y. Chen, “Cooperative reinforcement learning based on zero-sum games,” *2008 SICE Annual Conference*, pp. 2973-2976, 2008.
- [37] K. Vamvoudakis e F. Lewis, “Non-zero sum games: Online learning solution of coupled Hamilton-Jacobi and coupled Riccati equations,” *2011 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 171-178, 2011.
- [38] D. P. Javier Contreras, “Short – and Long – Term Nash Equilibria in Electricity Markets,” *Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-10, 2009.
- [39] “<http://www.item-game.com/>,” ITEM-Game, [Online]. Available: <http://www.item-game.com/>. [Acedido em 04 2014].
- [40] S. C. H, *A Byte of Python*, 2003.

Capítulo 7

Anexos

Neste capítulo apresentam-se os anexos desta dissertação.

7. Anexo I – Tutorial do processo de simulação

Neste anexo será explicado detalhadamente o processo utilizado para a realização de todas as simulações efetuadas.

Passo 1:

Na página da web <http://www.item-game.com/> fazer *download* dos ficheiros “ITEM-Game Player v2.4 e “ITEM-Game Manager v2.4”. Ainda será necessário um ficheiro alternativo denominado de “item_game_simulator_v2.4.2.jar” fornecido posteriormente.

Passo 2:

Após o *download* dos ficheiros, abrir o programa criado em Python. O programa desenvolvido cria um ficheiro de output em formato XML, que terá um nome atribuído pelo utilizador. Neste programa, existirão ainda as seguintes linhas de código:

Código utilizado no início do código desenvolvido:

```
sair = True  
acontador= -8  
while sair:
```

Código utilizado no fim do código desenvolvido:

```
import time  
print time.sleep(x)  
sair= True  
if sair == True:  
    acontador= acontador+8
```

Como se pode observar, foi criado um *loop*, onde consoante o tempo definido através da variável “x” em segundos, o programa irá esperar esse tempo até realizar outro ciclo, para que o simulador possa terminar a ronda e gerar um ficheiro de output. Este código automatiza o processo, pois só é necessário executar o programa inicialmente, em junção com o simulador.

Passo 3:

Após desenvolvido o programa, o utilizador deverá executar o ficheiro “item_game_manager_v2.4.jar” onde se poderá observar a seguinte janela, através da Figura 46

The screenshot shows the 'Create Game' interface of the ITEM-Game simulator. It is divided into several sections:

- Room Information:** Room Name (My Room), Room Type (Private), MultiGame (Yes), Games Restriction (No), Time Restriction (No).
- General Information:** Name, Short Name, Periods (8), Investment Cycle (2), Begin time [GMT].
- Demand:** Initial [MW] (4800), Rate [%] (5).
- Prices:** Max. Pool Price (200), Uranium [€/MWh] (1), Coal [€/MWh] (4), Gas [€/MWh] (9), CO2 [€/ton] (2).
- Time:** A table for defining time intervals for different periods.
- Players:** A list of available players (7) and empty boxes for 'To Play' (0) and 'To Invite' (0).
- Portfolio:** Budget [M€] (500) and a table of resources.

Name	Capacity	%	Emission	Cost	Quantity	Const_R	Oper_R
NUCLEAR	1000.0	30.0	0.0	900.0	0	4	10
COAL	500.0	40.0	1.0	150.0	0	3	8
CCGT	400.0	60.0	0.4	60.0	0	2	6
HYDRO	100.0	35.0	0.0	50.0	0	3	8
WIND	20.0	25.0	0.0	20.0	0	1	6
SOLAR	20.0	30.0	0.0	40.0	0	1	6

Figura 46 – Janela com diversos parâmetros do simulador ITEM-Game.

Como se pode observar, neste ficheiro podem-se definir as diversas variáveis e pode-se criar um jogo com os parâmetros pretendidos pelo utilizador. Um aspeto importante a reter na criação do nome do jogo, em *Name*, este tem de ser igual ao nome atribuído ao ficheiro XML de output gerado pelo programa em Python, para que haja interação entre ambos os programas.

Após selecionados os jogadores e definidos os parâmetros de jogo existe na Figura 46 um separador denominado de *Time* que terá duas caixas de texto, a primeira denominada de *View* será o tempo de espera entre cada ronda, e a segunda denominada de *Play*, será o tempo que cada jogador terá para efetuar a sua jogada. A definição do tempo de espera e do tempo de jogo é importante, pois a junção de ambos, será o tempo da variável “x”, a utilizar no programa, como exibido no passo 2.

Antes de criar o jogo, no separador *General Information*, o utilizador terá de definir o dia, tempo e horas a que o jogo será realizado.

Por fim, cria-se o jogo através do botão “*Create Game*”.

Passo 4:

Por ultimo, após criado o jogo, o utilizador deverá executar a linha de comandos, onde irá inserir o comando “cd” seguido pela pasta onde contém o programa desenvolvido em Python, juntamente com os simuladores. Este comando poderá ser observado na Figura 47.

```
Microsoft Windows [Version 6.3.9600]
(c) 2013 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\Emanuel>cd C:\Users\Emanuel\Dropbox\Meu\TESE\Programacao Python\XML\Testes\
Testes Relatorio Abril\Ronda 2\Teste 1 AAA\Emanuel

C:\Users\Emanuel\Dropbox\Meu\TESE\Programacao Python\XML\Testes\Testes Relatorio
Abril\Ronda 2\Teste 1 AAA\Emanuel>
```

Figura 47 – Linha de comandos utilizando o comando cd com a pasta especificada.

Após executar o comando “cd” o utilizador deverá introduzir o caminho onde terá instalado o executável java. Neste caso, no Windows 8, esse caminho será o “c:\Windows\SysWOW64\java”. Por último e como pode ser observado na Figura 48, após inserir o caminho do executável java, irá colocar o código: “-jar item_game_simulator_v2.4.jar -xml nome_do_ficheiro_escolhido”. Atenção, não carregar *enter* após inserir o caminho especificado.

```
C:\Users\Emanuel\Dropbox\Meu\TESE\Programacao Python\XML\Testes\Testes Relatorio
Abril\Ronda 2\Teste 1 AAA\Emanuel>c:\Windows\SysWOW64\java -jar item_game_simul
ator_v2.4.2.jar -xml teste_v1.xml
```

Figura 48 – Comando final utilizado para executar o simulador e o programa desenvolvido em Python.

Como se pode observar na figura acima, neste cenário o ficheiro xml criado pelo programa Python tem o nome de teste_v1.xml, o que variará consoante o nome especificado pelo utilizador.

Por último, quando o jogo começar, o utilizador deverá executar o comando, carregando no botão *enter* do teclado, o que deverá iniciar o simulador e realizará o jogo, com a estratégia pretendida.