



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



## **Previsão das Estratégias Competitivas dos Produtores de Energia Eléctrica no MIBEL**

**RICARDO FILIPE LUÍS FARIA**  
(Licenciado)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Electrotécnica - ramo de Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa  
Professora Ana Alexandra Antunes Figueiredo Martins

Júri:

Presidente: Professor Constantino Vital Sopa Soares

Vogais:

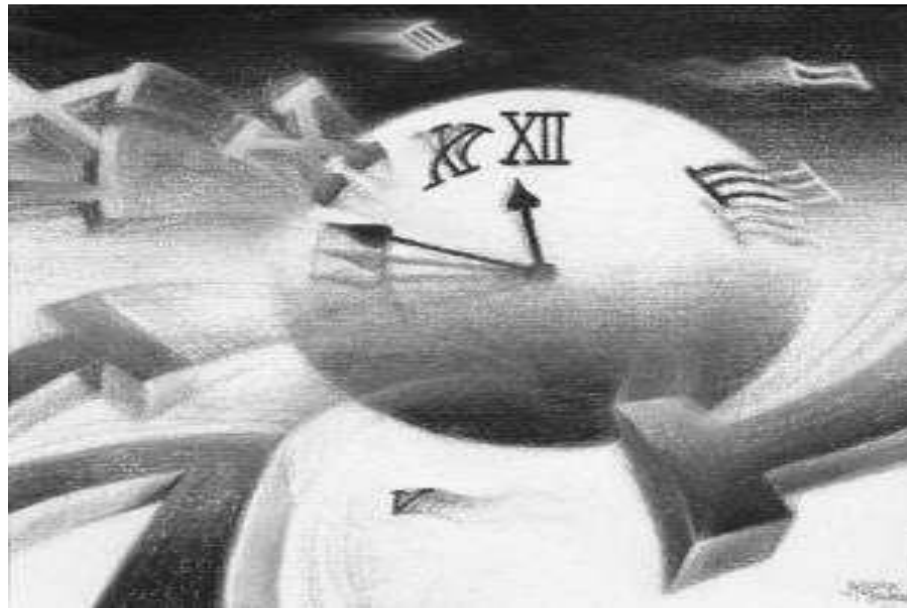
Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa  
Professora Ana Alexandra Antunes Figueiredo Martins  
Professor Pedro Alexandre Flores Correia

**Outubro de 2012**





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



## **Previsão das Estratégias Competitivas dos Produtores de Energia Eléctrica no MIBEL**

**RICARDO FILIPE LUÍS FARIA**  
(Licenciado)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Electrotécnica - ramo de Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa  
Professora Ana Alexandra Antunes Figueiredo Martins

Júri:

Presidente: Professor Constantino Vital Sopa Soares

Vogais:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa  
Professora Ana Alexandra Antunes Figueiredo Martins  
Professor Pedro Alexandre Flores Correia

**Outubro de 2012**



## **Agradecimentos**

A execução deste trabalho foi possível com o apoio e ajuda da minha família, amigos e ainda colegas e professores, aproveito assim esta oportunidade para expressar o meu agradecimento a essas pessoas.

Em primeiro lugar, aos meus pais Palmira e Eduino, por todo o apoio e incentivo transmitidos ao longo da realização deste trabalho, sem os quais tal não seria possível.

Aos orientadores, professor Jorge de Sousa e professora Ana Martins pela proposta do tema e por todo o esforço, ajuda e apoio dispendidos durante todo o período dedicado à realização deste trabalho.

Sem deixar de agradecer ao professor João Lagarto por todo o tempo dispendido, encontrando-se sempre disponível para ajudar e esclarecer dúvidas ao longo do desenvolvimento de todo o trabalho.

Agradeço ainda à EDP pelos dados, comentários e sugestões na pessoa do Engenheiro Allen Lima e da sua equipa.

Por último, aos colegas do mestrado em Engenharia Electrotécnica no Ramo de Energia, por todo o seu apoio, amizade e companheirismo.



## **Resumo**

O Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL) surge na perspectiva de integração e cooperação dos sectores eléctricos português e espanhol, em resposta ao incentivo da União Europeia (UE) na criação de mercados regionais de electricidade, considerando um posterior alargamento para um mercado europeu de energia.

A presente dissertação incide no estudo da previsão horária das estratégias competitivas dos agentes produtores de energia eléctrica no MIBEL, sendo abordado um horizonte de previsão de 5 dias úteis.

A variável em estudo trata-se da variação conjectural referente ao próprio MIBEL, a qual estima o grau de competitividade dos agentes do lado da oferta no mercado diário.

A metodologia utilizada para previsão passou pela análise de sucessões cronológicas, aplicando modelos ARIMA e modelos de alisamento exponencial.

Uma análise breve da previsão do preço horário de energia eléctrica no mercado diário do MIBEL foi também realizada, sendo efectuada a comparação entre a previsão obtida pela análise de sucessões cronológicas e o cálculo do valor de preço previsto com recurso aos dados de variação conjectural previstos.

Os resultados alcançados revelam que os modelos estimados que melhor se adequam à previsão horária da variação conjectural referente ao MIBEL, corresponderam maioritariamente ao tipo ARIMA sazonal com sazonalidade diária, seguido de modelos do tipo ARIMA não sazonal. Foi observado ainda, que os modelos seleccionados foram estimados maioritariamente com recurso a uma sucessão cronológica de 5 dias úteis. Por fim, ambas as abordagens utilizadas para realizar a previsão horária do preço de energia eléctrica apresentaram em média, erros médios absolutos para a previsão de 1 e 5 dias úteis iguais entre si.

**Palavras-chave:** MIBEL, previsão, sucessões cronológicas, ARIMA, variação conjectural



## **Abstract**

The Iberian Electricity Market (IBELM) appears in the perspective of integration and cooperation between Portuguese and Spanish electricity markets, in response to the European Union incentive for regional electricity markets creation, considering a further extension to a European energy market.

The present dissertation focus on the study of the competitive strategies of electricity producers hourly forecasting in IBELM, addressing a forecast horizon of 5 working days.

For this analysis, was used as a variable in study the IBELM's conjectural variation, which estimate the level of competitiveness of the agents on the supply side in the day-ahead market.

The methodology adopted for forecasting was time series analysis, using ARIMA and exponential smoothing models.

A brief analysis of the IBELM day-ahead hourly electricity price forecast was also discussed, being performed the comparison between the forecasting through time series analysis and the calculated electricity price using conjectural variation forecasted data.

The results obtained show that the estimated models that best suit the hourly IBELM conjectural variation forecast were mainly of the ARIMA seasonal type with daily seasonality, followed by ARIMA non-seasonal type models. It was also observed, that the selected models were mainly estimated with a time series of 5 working days. In relation to the electricity price forecast, both of the approaches studied presented in average equal mean absolute errors for a forecast window of 1 and 5 working days.

**Keywords:** IBELM, forecasting, time series, ARIMA, conjectural variation



# Índice de Conteúdos

<b>Agradecimentos</b> .....	iii
<b>Resumo</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vii
<b>Índice de Conteúdos</b> .....	ix
<b>Índice de Tabelas</b> .....	xiii
<b>Índice de Figuras</b> .....	xv
<b>Lista de Acrónimos</b> .....	xix
<b>Lista de Símbolos</b> .....	xxiii
<b>Capítulo 1 - Introdução</b> .....	1
1.1 – Enquadramento .....	3
1.2 – Motivação .....	4
1.3 – Estado da Arte .....	6
1.4 – Estrutura do Texto .....	18
<b>Capítulo 2 - Mercados de Energia Eléctrica</b> .....	21
2.1 – Reestruturação do Sector Eléctrico .....	23
2.1.1 – Evolução em Portugal .....	28
2.1.2 – Evolução em Espanha .....	29
2.2 – Mercado Ibérico de Electricidade .....	31
2.2.1 – Desenvolvimento do Mercado .....	31
2.2.2 – Funcionamento do Mercado .....	33
<b>Capítulo 3 - Metodologia de Previsão</b> .....	39
3.1 – Análise de Sucessões Cronológicas .....	41
3.1.1 – Componentes de uma Sucessão Cronológica .....	43
3.1.2 – Tipos de Modelos Utilizados .....	44
3.1.3 – Validação dos Pressupostos do Modelo .....	47
3.1.4 – Avaliação da Qualidade de Ajustamento .....	48
3.1.5 – Software Utilizado .....	50
<b>Capítulo 4 - Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores</b> .....	53
4.1 – Análise e Tratamento dos Dados Utilizados .....	55

## Índice de Conteúdos

4.1.1 – Análise Descritiva – 1º Período de Dados .....	57
4.1.2 – Análise Descritiva – 2º Período de Dados .....	62
4.2 – Estudos Preliminares – 1º Período de Dados .....	66
4.2.1 – Modelação - Conjunto de Dados C1 .....	66
4.2.2 – Modelação - Conjunto de Dados C2 .....	67
4.2.3 – Modelação - Conjunto de Dados C3 .....	67
4.3 – Processo de Modelação.....	70
4.4 – Resultados – 2º Período de Dados .....	71
4.4.1 – Casos de Estudo .....	72
4.4.2 – Resultados Globais.....	79
4.4.3 – Aplicação no Estudo da Previsão do Preço de Fecho de Mercado .....	83
<b>Capítulo 5 - Conclusões.....</b>	<b>93</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>99</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>107</b>
Anexo 1 – Resultados obtidos para 30 Janelas Temporais .....	109
Anexo 2 – Estatísticas de Teste e Resultados .....	115
Teste Shapiro-Wilk .....	115
Teste <i>t-student</i> .....	116
Teste Wilcoxon .....	118





## Índice de Tabelas

<b>Tabela 4.1-</b> Estatística descritiva dos dados de variação conjectural no MIBEL entre Julho de 2007 e Junho de 2008.....	61
<b>Tabela 4.2-</b> Estatística descritiva dos dados de variação conjectural no MIBEL entre os dias úteis de Novembro de 2010 e Outubro de 2011. ....	65
<b>Tabela 4.3-</b> Resultados obtidos após a modelação para os casos de estudo apresentados.....	72
<b>Tabela 4.4-</b> Resultados obtidos para a previsão de 1 dia para os diferentes casos de estudo. ....	73
<b>Tabela 4.5-</b> Resultados obtidos para a previsão de 5 dias para os diferentes casos de estudo. ....	74
<b>Tabela 4.6-</b> Resultados obtidos no teste <i>t-student</i> para 1 e 5 dias úteis. ....	88
<b>Tabela 4.7-</b> Resultados obtidos no teste Wilcoxon para 1 e 5 dias úteis.....	89
<b>Tabela A.1-</b> Resultados obtidos pela estimação de 30 janelas temporais para o ano de 2011. ....	109
<b>Tabela A.2-</b> Resultados obtidos para a previsão de 1 e 5 dias úteis em 30 janelas temporais para o ano de 2011. ....	112
<b>Tabela A.3-</b> Resultados obtidos pelo teste de Shapiro-Wilk para 1 dia útil. ....	115
<b>Tabela A.4-</b> Resultados obtidos pelo teste de Shapiro-Wilk para 5 dias úteis. ....	115
<b>Tabela A.5-</b> Resultados obtidos pelo teste de <i>t-student</i> para 1 dia útil. ....	117
<b>Tabela A.6-</b> Resultados obtidos pelo teste de <i>t-student</i> para 5 dias úteis.....	117
<b>Tabela A.7-</b> Resultados obtidos pelo teste de Wilcoxon para 1 dia útil.....	118
<b>Tabela A.8-</b> Resultados obtidos pelo teste de Wilcoxon para 5 dias úteis. ....	119



## Índice de Figuras

<b>Figura 2.1-</b> Curvas de oferta e procura num mercado <i>spot</i> .....	34
<b>Figura 2.2-</b> Diferencial de preços horários entre Portugal e Espanha no mercado diário devido à separação de mercados. ....	37
<b>Figura 4.1-</b> Representação esquemática do funcionamento do simulador SiMEC v3.0 em modo de estimação.. ....	56
<b>Figura 4.2-</b> Representação esquemática do funcionamento do simulador SiMEC v3.0 em modo de previsão. ....	56
<b>Figura 4.3-</b> Cronograma da variação conjectural no MIBEL para o mês de Setembro de 2007.....	59
<b>Figura 4.4-</b> Cronograma da variação conjectural no MIBEL na semana de 3 a 9 de Setembro de 2007. ....	59
<b>Figura 4.5-</b> Diagrama de caixas para os dados de variação conjectural no MIBEL entre Julho de 2007 e Junho de 2008.....	60
<b>Figura 4.6-</b> Evolução da variação conjectural no MIBEL em Março de 2011 (dias úteis). ....	63
<b>Figura 4.7-</b> Cronograma da variação conjectural no MIBEL na semana de 14 a 18 de Março de 2011 (dias úteis). ....	64
<b>Figura 4.8-</b> Diagrama de caixas para os dados de variação conjectural no MIBEL entre os dias úteis de Novembro de 2010 e Outubro de 2011. ....	65
<b>Figura 4.9-</b> Representação da sequência tomada para modelação.....	68
<b>Figura 4.10-</b> Representação da interacção entre a programação realizada no software SPSS e a programação realizada em VBA. ....	70
<b>Figura 4.11-</b> Representação esquemática das etapas concretizadas pelo processo de modelação concebido. ....	71
<b>Figura 4.12-</b> Variação conjectural calculada, ajustada e prevista para o modelo seleccionado no estudo de 17 de Março a 23 de Março de 2011.....	75
<b>Figura 4.13-</b> Variação conjectural calculada, ajustada e prevista para o modelo seleccionado no estudo de 15 de Julho a 21 de Julho de 2011. ....	76

<b>Figura 4.14-</b> Variação conjectural calculada, ajustada e prevista para o modelo seleccionado no estudo de 11 de Outubro a 17 de Outubro de 2011.....	77
<b>Figura 4.15-</b> Variação conjectural calculada, ajustada, prevista e preço de fecho standardizados para o período de 17 de Março a 23 de Março de 2011.....	78
<b>Figura 4.16-</b> Valor de BIC registado pelos modelos seleccionados para as 30 janelas temporais estudadas, em função da dimensão da sucessão cronológica.....	80
<b>Figura 4.17-</b> Percentagem da dimensão da sucessão cronológica em função das 30 janelas temporais analisadas. ....	80
<b>Figura 4.18-</b> Valores de $R^2$ registados para as diferentes janelas temporais. ....	81
<b>Figura 4.19-</b> Percentagem do número de dias úteis que os modelos seleccionados para as 30 janelas temporais necessitam para realizar a previsão. ....	82
<b>Figura 4.20-</b> Erro médio absoluto para 1 e 5 dias úteis registados nas 30 janelas temporais estudadas. ....	83
<b>Figura 4.21-</b> Preço de fecho de mercado observado, previsto directamente e previsto indirectamente para o período de 8 de Julho a 14 de Julho de 2011. ....	84
<b>Figura 4.22-</b> Diagrama de caixas referente à diferença entre os erros médios absolutos para 1 dia útil provenientes da previsão directa e indirecta para os 30 casos de estudo. ....	87
<b>Figura 4.23-</b> Diagrama de caixas referente à diferença entre os erros médios absolutos para 5 dias úteis provenientes da previsão directa e indirecta para os 30 casos de estudo. ....	87





## **Lista de Acrónimos**

ANFIS – *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*

AR – *Auto-Regressive*

ARIMA – *Auto-Regressive Integrated Moving Average*

ARMA – *Auto-Regressive Moving Average*

BIC – *Normalized Bayesian Information Criterion*

CAE – *Contratos de Aquisição de Energia*

CFDI – *Confidence Interval*

CMEC – *Custos de Manutenção do Equilíbrio Contratual*

CNE – *Comissão Nacional de Energia*

EDP – *Energias de Portugal*

ERSE – *Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos*

GARCH – *Generalized Auto-Regressive Conditionally Heteroskedastic*

IBELM – *Iberian Electricity Market*

ISEL – *Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*

KKT – *Karush-Kuhn-Tucker*

MA – *Moving Average*

MAPE – *Mean Absolute Percentage Error*

MCP – *Market Clearing Price*

MIBEL – *Mercado Ibérico de Electricidade*

MIE – *Mercado Interno de Electricidade*

MSE – *Mean Square Error*

OMI – *Operador de Mercado Ibérico*

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

OMIP – *Operador de Mercado Ibérico de Energia, pólo Português*

*Lista de Acrónimos*

PJM - *Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection*

PRE – Produção em Regime Especial

PURPA - *Public Utility Regulatory Policies Act*

REE – *Red Eléctrica de España*

REN – Rede Eléctrica Nacional, S.A.

RMSE – *Root Mean Square Error*

RNT – Rede Nacional de Transporte

SEI – Sistema Eléctrico Independente

SEN – Sistema Eléctrico Nacional

SENV – Sistema Eléctrico não Vinculado

SEP – Sistema Eléctrico Público

SPSS – *Statistical Package for the Social Sciences*

VBA – *Visual Basic for Applications*

VOLA – *Volatility*

UE – União Europeia





## Lista de Símbolos

$\pi_i$  – lucro da empresa produtora  $i$

$Q_T$  – quantidade total em MWh vendida no mercado

$P(Q_T)$  – preço de mercado em €/MWh

$q_i$  – quantidade produzida pela firma  $i$  em MWh

$q_{p,i}$  – quantidade produzida em MWh pela central  $p$  que é propriedade da firma  $i$

$C_T(q_{p,i})$  – custo total da firma  $i$  em € em função da quantidade produzida pelas suas centrais

$Q_{\max p,i}$  – capacidade máxima da central  $p$  da firma  $i$  em MW

$CM_p$  – custo marginal da central  $p$  da firma  $i$

$\lambda_{p,i}$  – multiplicador de Lagrange

$\theta_i$  – variação conjectural da firma  $i$

$y_t$  – valor observado no instante  $t$

$T$  – número total de observações

$p$  – ordem do processo de AR

$d$  – ordem do processo de diferenciação

$q$  – ordem do processo de MA

$L$  – operador *lag*

$L^s$  – operador *lag* respeitante à componente sazonal

$\emptyset(L)$  – polinómio auto-regressivo não sazonal de ordem  $p$

$\theta(L)$  – polinómio de médias móveis não sazonal de ordem  $q$

$Y_t$  – sucessão cronológica univariada

$e_t$  – erro gerado por um processo de ruído branco

$P$  – ordem do processo AR sazonal

$D$  – ordem do processo de diferenciação sazonal

$Q$  – ordem do processo MA sazonal

## *Lista de Símbolos*

$\phi(L^S)$  – polinómio auto-regressivo sazonal de ordem P

$\Theta(L^S)$  – polinómio de médias móveis sazonal de ordem Q

g – período de previsão

$\gamma_g$  – covariância

$\rho_g$  – coeficiente de correlação de Pearson

k – número de parâmetros do modelo

$\bar{Y}$  – valor médio das observações da sucessão cronológica

$\hat{Y}(t)$  – valor estimado pela análise de sucessões cronológicas

$\beta_j$  – coeficientes do modelo

$\theta_{\text{MIBEL}}$  – variação conjectural referente ao MIBEL

$\theta_{\text{ES}}$  – variação conjectural referente ao mercado espanhol

$\theta_{\text{PT}}$  – variação conjectural referente ao mercado português

$E_{\text{ES}}$  – energia vendida no mercado espanhol em MWh

$E_{\text{PT}}$  – energia vendida no mercado português em MWh

$P_{\text{MIBEL}}$  – preço de fecho de mercado no MIBEL em €/MWh

$P_{\text{ES}}$  – preço de fecho do mercado espanhol em €/MWh

$P_{\text{PT}}$  – preço de fecho do mercado português em €/MWh

$|e_t|$  – erro absoluto de previsão

$\bar{E}$  – valor médio

$S'_e$  – desvio padrão

$\text{EMA}_{1\text{dd}, 1\text{di}}$  – erro médio absoluto correspondente à previsão directa ou indirecta respectivamente, para 1 dia útil

$\text{EMA}_{5\text{dd}, 5\text{di}}$  – erro médio absoluto correspondente à previsão directa ou indirecta respectivamente, para 5 dias úteis

$P_{\text{obs}}$  – preço observado

$P_{\text{d},i}$  – preço previsto directamente ou indirectamente respectivamente

$\mu_{e,d}$  – erros médios absolutos obtidos pela previsão directa do preço de mercado

$\mu_{e,i}$  – erros médios absolutos obtidos pela previsão indirecta do preço de mercado

$M_{e,d}$  – mediana referente ao erro da previsão directa do preço de mercado

$M_{e,i}$  – mediana referente ao erro da previsão indirecta do preço de mercado

$W$  – estatística de teste de Shapiro-Wilk

$a_i$  – constantes geradas a partir da média, variância e covariância de  $k$  ordens com distribuição Normal  $N(0,1)$ , tratando-se de valores tabelados

$k$  – dimensão da amostra

$X_i$  – valores ordenados da variável  $X$  por ordem crescente

$\bar{X}$  – estimador média da variável  $X$

$n$  – número de pares de observações

$\bar{D}$  – estimador referente à diferença das amostras

$\mu_D$  – valor médio da diferença das amostras

$S'_D$  – estimador variância da diferença das amostras

$Z$  – estatística de teste de Wilcoxon

$m$  – número de casos com diferenças não nulas

$l$  – número de casos ligados

$t_j$  – número de casos referentes à ligação  $j$ ,  $j = 1, \dots, l$

$S^+$  – soma das diferenças positivas

$S^-$  – soma das diferenças negativas



---

# Capítulo 1

---

## Introdução

*Neste capítulo é realizada uma introdução ao tema abordado na presente dissertação. Apresenta-se o enquadramento do estudo efectuado, a motivação para abordar o tema seleccionado e o estado da arte. É apresentada ainda, a estrutura do texto adoptada na dissertação.*



# **1 – Introdução**

## **1.1 – Enquadramento**

O sector eléctrico tem sido alvo de grandes mudanças. Durante largos anos do século passado, o sector eléctrico foi propriedade do estado ou de empresas monopolistas (Tomé, 2009). Porém, surgiu uma profunda alteração estrutural à escala mundial do sector, em especial destaque a partir da década de 90 do século XX, levando assim à modificação da visão do sector previamente estabelecida, designando-se genericamente por reforma.

Esta reforma, consistiu na liberalização dos segmentos, liberalizando as actividades do sector potencialmente competitivas (produção e comercialização) e realizando a regulação dos segmentos considerados como monopólios naturais.

Desta forma, surge o conceito de mercado livre e competitivo que se adequa melhor às necessidades de toda a sociedade, onde o sector eléctrico contém um papel preponderante. Foram estabelecidas mudanças que apontam para a concepção de um mercado de electricidade competitivo, sendo o mesmo baseado nas leis da oferta e procura, em detrimento do regime monopolista característico dos sistemas energia previamente conhecidos (Martins, 2009).

A reestruturação do sector eléctrico levou deste modo à desintegração vertical das diferentes empresas integrantes das distintas actividades que o constituem, bem como, o aparecimento de mercados de electricidade.

A existência de ambiente competitivo pela integração de mercados de electricidade no sector eléctrico, levou a que o preço da electricidade deixe de ser formado com base em métodos próprios de regulação (tais como processos de tarifação com base em custos médios), incrementais ou marginais, passando a ser definido por mecanismos de mercado, no que diz respeito à produção de energia eléctrica.

A exploração do sector eléctrico em ambiente competitivo tem como objectivo aumentar a eficiência do sector de energia eléctrica. Por conseguinte, pela exploração do sector eléctrico em regime de mercado correctamente

## *Introdução*

implementado e regulado advêm melhorias de eficiência da produção de electricidade, redução de preços para os consumidores, melhor alocação de risco e incentivo ao crescimento económico.

A criação de mercados de electricidade bolsistas dotou o sector de novas características. À semelhança de outras bolsas, os agentes do lado da oferta intervenientes no mercado assumem posições estratégicas de forma a maximizar o seu proveito, influenciando em contrapartida o mesmo.

Assim, o tema abordado na presente dissertação revela-se importantíssimo, propondo a previsão horária de um parâmetro que estima o grau de competitividade dos agentes do lado da oferta, no Mercado Ibérico de Electricidade – MIBEL para um horizonte temporal de 5 dias úteis.

## **1.2 – Motivação**

A reestruturação do sector eléctrico, ao longo de todo o mundo revela-se de grande importância, uma vez que aponta no favorecimento do funcionamento competitivo das actividades de produção e comercialização do sector, adoptando a criação de mercados de electricidade. A reestruturação, aponta igualmente no sentido da regulação nas actividades do sector passíveis de ser consideradas monopólios naturais, tal como é o caso do transporte e distribuição de energia eléctrica.

A evolução histórica no âmbito dos mercados de electricidade (ou mercados de energia eléctrica) apresenta bons resultados, nomeadamente no caso de alguns mercados mais recentes e evoluídos tais como o *NordPool* e o MIBEL.

O MIBEL surge a 1 de Julho de 2007 a fim de corresponder aos interesses dos diversos participantes em Portugal e Espanha, constituindo assim um mercado multinacional englobando a Península Ibérica.

Os objectivos estabelecidos pela Comissão Europeia em Março de 2007 para o horizonte de 2020, mais conhecidos pelas metas 20-20-20, são um dos factores de extrema importância para o sector eléctrico, sendo os mesmos os seguintes (Europeia, 2007):

- Diminuição das emissões de gases com efeito de estufa em 20% relativamente aos níveis de 1990 (podendo aumentar até 30% no caso de outros países desenvolvidos e em desenvolvimento se sujeitem a metas comparáveis);
- Aumento da contribuição de energias renováveis para 20% do consumo energético;
- Aumento da eficiência energética em 20%;
- Aumento da contribuição dos biocombustíveis nos transportes para 10%.

No mercado de energia eléctrica o comportamento estratégico dos diversos agentes, mais propriamente dos agentes produtores, constitui um factor preponderante e de extrema importância, pelo que a globalidade de todo o mercado é influenciada pelo comportamento descrito pelos mesmos.

O grau de competitividade dos agentes produtores no mercado de electricidade pode ser influenciado por diversos factores, dentro dos quais encontra-se o preço dos combustíveis utilizados na produção de energia eléctrica, preço de mercado da energia eléctrica, restrições técnicas das suas centrais, entre outros.

O objectivo central das empresas do lado da oferta reside essencialmente na maximização do seu lucro. Deste modo, antever com o maior grau de precisão possível todos os factores intervenientes nas suas decisões constitui um factor importante, permitindo planear as suas estratégias maximizando os seus benefícios.

As decisões tomadas por cada empresa, terão consequências nas decisões tomadas por outras empresas e por conseguinte influenciarão o mercado. Desta forma, as empresas realizarão as suas acções de acordo com um determinado comportamento estratégico, dado a suposição que as restantes empresas se irão comportar de uma forma específica em resposta à decisão tomada pela mesma.

Por conseguinte, a modelação e previsão do grau de competitividade dos agentes do lado da oferta permite compreender a influência das empresas produtoras de energia eléctrica no mercado, bem como, o impacto que determinadas medidas adoptadas terão sobre o nível competitivo desempenhado pelas mesmas.

## *Introdução*

O presente trabalho destina-se à realização da previsão das estratégias competitivas dos agentes produtores de energia eléctrica num mercado de energia eléctrica, mais propriamente no MIBEL. Para tal é proposta a modelação e previsão horária da variação conjectural no MIBEL, a qual estima o grau de competitividade dos agentes do lado da oferta intervenientes no MIBEL. A metodologia a utilizar passará pela análise sucessões cronológicas a fim de elaborar o modelo para realizar a previsão. De notar, que a utilização de sucessões cronológicas revela-se de grande importância, uma vez que permite analisar o nível competitivo das empresas no mercado, possibilitando desta forma observar a existência de sazonalidade e volatilidade característicos ao comportamento das mesmas, analisando para tal somente um conjunto de observações anteriores.

A motivação para abordar este tema advém da possibilidade da análise do nível de competitividade futuro praticado pelas empresas produtoras, proporcionando assim uma visão cuidada não só do comportamento das mesmas, mas também do impacto que as mesmas terão no nível competitivo registado no mercado. Assim, no presente estudo recorre-se ao estudo da previsão horária das estratégias competitivas dos agentes produtores, com o objectivo da criação de modelos previsionais com recurso à análise de sucessões cronológicas a fim de permitir a inferência sobre a competitividade futura no MIBEL.

### **1.3 – Estado da Arte**

A liberalização do sector eléctrico contribuiu para uma maior volatilidade e incerteza dos preços de energia eléctrica. Em mercados competitivos, os preços da energia eléctrica reagem rapidamente às variações na oferta e na procura, assumindo uma influência significativa nas estratégias das empresas produtoras.

Devido à volatilidade e incerteza dos preços da energia eléctrica, em conjunto com a procura da melhor solução possível (maximização do lucro) por parte das empresas produtoras, as mesmas recorrem à previsão dos preços da energia eléctrica. Uma previsão fiável dos preços da energia eléctrica representa uma vantagem competitiva para as empresas produtoras, já que permite que os decisores tenham uma melhor compreensão sobre as incertezas do futuro e o risco associado às suas decisões. Para tal, os agentes do lado da oferta recorrem à

modelação para a realização do planeamento de mercado a fim de maximizar os seus benefícios, pelo que assim a previsão deve ser parte integrante na sua tomada de decisões. Do lado da procura, a mesma abordagem é utilizada, no entanto com fins distintos. A previsão do preço da energia eléctrica constitui assim um factor importante no sector eléctrico, pelo que a análise da evolução dos processos a esse fim destinados é de grande interesse, permitindo analisar o seu contributo para o sector.

Daneshi e Daneshi (2008) apresentam uma compilação de literatura publicada para a previsão do preço, apresentando vários métodos utilizados para esse fim. A previsão do preço tem sido o centro de estudos intensos em outros mercados a não ser o eléctrico, tais como por exemplo o mercado agrícola. No entanto, a electricidade apresenta um comportamento distinto, caracterizado por um movimento dotado de grande volatilidade, podendo contribuir com um erro alargado aquando a previsão do preço. Normalmente, utilizam-se os métodos de previsão para a determinação do preço de fecho de mercado, ou *Market Clearing Price* (MCP). Um dos grandes problemas referentes à precisão dos modelos elaborados, surge sob a forma do aparecimento de um dado MCP incomum num determinado instante no tempo (*price spikes*). Este problema pode surgir por vários motivos, dentro dos quais congestionamento do transporte nas linhas e contingências a nível da produção da energia eléctrica.

Li et al. (2006) estabelece a classificação e posterior comparação das diferentes técnicas na literatura da previsão do preço da electricidade. Segundo o mesmo, são tipicamente realizadas previsões utilizando horizontes temporais distintos. As previsões identificam-se assim como previsões a curto prazo, a médio prazo e previsões a longo prazo. As previsões a curto prazo influenciam o mercado directamente, permitindo aos agentes do lado da oferta ajustarem as suas estratégias, enquanto que os consumidores podem incidir as suas decisões através da análise do preço praticado. As previsões a médio prazo beneficiam os contratos bilaterais entre a oferta e o consumo, permitindo aos agentes do lado da oferta estabelecer uma carteira de vendas à bolsa e a realização de contratos bilaterais. Por fim, as previsões a longo prazo permitem o estudo sobre a transmissão e reforço das linhas, bem como o planeamento da distribuição regional de energia.

## Introdução

Os modelos de previsão podem ser subdivididos em modelos estatísticos e modelos não estatísticos. Os primeiros são elaborados estabelecendo uma relação de entrada/saída pela utilização de sucessões cronológicas ou através da análise estatística. Já os modelos não estatísticos, referem-se a modelos que permitem a simulação, ou modelos de análise de equilíbrio tal como a realização de simulação da operação detalhada do sistema eléctrico ou a elaboração de despacho económico (Li et al., 2006).

Os modelos estatísticos são constituídos por três categorias principais, nomeadamente modelos de sucessões cronológicas, modelos econométricos e sistemas inteligentes (Li et al., 2006). As aplicabilidades dos modelos estatísticos na electricidade concentram-se na previsão do MCP e nas suas propriedades estatísticas como os intervalos de confiança ou *Confidence Interval* (CFDI), podendo ainda por vezes ser analisada a volatilidade ou *Volatility* (VOLA) do MCP (Li et al., 2006).

A análise de sucessões cronológicas e as suas aplicações têm revelado grande importância em vários campos de investigação, tais como a área financeira, económica e engenharia (Daneshi e Daneshi, 2008).

A metodologia para análise, descrição e previsão de uma sucessão cronológica é um método sofisticado de extrapolação de dados, que se caracteriza por uma variável que pode ser explicada apenas pelo tempo e pelas suas realizações anteriores (Magalhães, 1993). Nesta classe de modelos assume-se, pois não são estabelecidas relações causais acerca do comportamento da variável em estudo (Magalhães, 1993). Uma sucessão cronológica (também designada por série cronológica ou série temporal) trata-se de um conjunto de observações quantitativas sobre determinada variável respeitantes a diferentes momentos no tempo, que deverão ser equidistantes. Assim, a análise de sucessões cronológicas constitui um dos instrumentos de planeamento e permite conhecer como determinados fenómenos se comportam no passado e qual o seu comportamento possível no futuro. Uma das razões subjacentes ao estudo de uma sucessão cronológica é a descoberta de traçados sistemáticos na série de dados que permitam a construção de um modelo matemático que explica o passado da série (Magalhães, 1993). A abordagem dos modelos quantitativos na previsão de sucessões cronológicas teve início na década de 50. Posteriormente com o

desenvolvimento tecnológico, o desenvolvimento de técnicas mais sofisticadas foi possível, surgindo assim em 1976 a metodologia de Box-Jenkins, propondo uma família de modelos algébricos (Magalhães, 1993).

Daneshi e Daneshi (2008) refere que os métodos de previsão do preço da electricidade utilizando sucessões cronológicas podem ser métodos estatísticos/matemáticos ou métodos heurísticos baseados em algoritmos inteligentes. Os modelos de previsão baseados em sucessões cronológicas mais frequentes, podem ser elaborados pela utilização dos seguintes métodos:

- Métodos de alisamento exponencial;
- Métodos de regressão;
- *Auto-Regressive Moving Average* (ARMA);
- *Auto-Regressive Integrated Moving Average* (ARIMA);
- *Generalized Auto-Regressive Conditionally Heteroskedastic* (GARCH);
- *Threshold methods*.

Os primeiros quatro métodos apresentados anteriormente são métodos lineares, sendo os restantes métodos não lineares (Daneshi e Daneshi, 2008). Os modelos ARMA surgem da combinação de duas subfamílias, nomeadamente dos modelos de médias móveis ou *Moving Average models* (MA) e de modelos auto-regressivos ou *Auto-Regressive models* (AR). “Um modelo ARMA aplicado a um processo não estacionário homogéneo designa-se por modelo ARIMA” (Magalhães, 1993). O uso de modelos ARIMA é muito útil na análise de sucessões cronológicas, pois grande parte das sucessões cronológicas não são estacionárias. A utilização de modelos ARIMA é realizada na metodologia de Box-Jenkins.

A selecção do método a utilizar para previsão é constituída por três níveis distintos: identificação, estimação e teste de diagnóstico (Daneshi e Daneshi, 2008). No primeiro nível são escolhidos os métodos mais promissores para representarem adequadamente os dados em estudo. No segundo nível, os valores referentes aos parâmetros do modelo são obtidos. Por fim, no último nível são aplicados testes estatísticos de forma a observar se o comportamento do modelo é o adequado para representar os dados em análise.

## *Introdução*

Em Koreneff et al. (1998) é utilizado um modelo de sucessões cronológicas com base em análise regressiva para prever o *spot price*.

Stevenson (2001) realizou a previsão do MCP, utilizando para tal modelos AR em conjunto com um filtro *wavelet*.

Em Ni e Luh (2001) foi elaborada a previsão das funções densidade de probabilidade discretas do MCP, através da utilização de modelos AR.

A abordagem de Nogales et al. (2002) é de grande interesse, baseando-se na utilização de modelos de função transferência e de regressão dinâmica como ferramenta para realizar a previsão do preço nos mercados eléctricos de Espanha e Califórnia. Os autores, referem que a sua escolha deve-se ao facto de as sucessões cronológicas relativas ao preço horário nos mercados competitivos apresentarem as seguintes características:

- Frequência elevada;
- Média e variância não constante;
- Sazonalidade múltipla, correspondendo a periodicidade diária e semanal;
- Efeito de calendário, como o comportamento relativo a feriados e fins-de-semana;
- Volatilidade elevada;
- Elevada percentagem de preços incomuns.

O seu objectivo foca-se na previsão a 24 horas do preço da energia eléctrica, sendo assim previstas 24 horas para cada dia de uma semana. Para tal, os autores realizam modelos distintos para as diferentes análises a efectuar. Foram utilizados para este estudo dados dos mercados eléctricos de Espanha e Califórnia referentes ao ano 2000. Foram abordadas duas semanas como casos de estudo distintos a fim de executar a previsão e validação dos modelos propostos no caso do mercado espanhol. Para o mercado espanhol foram seleccionadas como casos de estudo a terceira semana de Agosto do ano 2000 e terceira semana de Novembro do ano 2000. Para prever a primeira semana foram utilizados dados horários de 1 de Junho a 20 de Agosto de 2000, já para a segunda semana dados horários de 1 de Janeiro a 12 de Novembro. Relativamente à previsão e validação dos modelos propostos para o mercado californiano, apenas foi utilizado um caso de estudo, sendo o mesmo referente à semana de 3 a 9 de Abril

do ano 2000 com dados de 1 de Janeiro a 2 de Abril. De acordo com os resultados obtidos para os diferentes casos de estudo, foi alcançado um erro médio na ordem dos 5% para o mercado espanhol, enquanto que para o mercado californiano o erro médio foi na ordem dos 3%. Segundo os autores o mercado espanhol é menos previsível que o mercado californiano uma vez que apresenta uma maior volatilidade relativamente ao mercado californiano, levando a que a previsão deste seja menos precisa. Todavia, os autores indicam que as previsões obtidas são suficientemente precisas para suportar decisões sobre as estratégias dos produtores e consumidores de energia eléctrica em ambos os mercados.

Modelos ARIMA foram utilizados por Contreras et al. (2003) para prever preços horários nos mercados eléctricos de Espanha e Califórnia. Para tal, os autores realizaram modelos distintos para as análises a efectuar. Procedeu-se assim à utilização para este estudo de dados dos mercados eléctricos de Espanha e Califórnia mais uma vez referentes ao ano 2000. Foram abordadas três semanas como casos de estudo distintos a fim de realizar a previsão e validação do método ARIMA no caso do mercado espanhol. Para o mercado espanhol foram seleccionadas como casos de estudo a última semana de Maio do ano 2000, última semana de Agosto do ano 2000 e terceira semana de Novembro do ano 2000. Para prever a primeira semana foram utilizados dados horários de 1 de Janeiro a 24 de Março de 2000, para a segunda semana dados de 1 de Junho a 24 de Agosto e para a terceira semana dados de 1 de Setembro a 12 de Novembro. Relativamente à previsão e validação do método ARIMA no mercado californiano apenas foi utilizado um caso de estudo, sendo o mesmo referente à semana de 3 a 9 de Abril do ano 2000 com dados de 1 de Janeiro a 2 de Abril. De acordo com os resultados obtidos, os autores realizaram a análise para todos os casos de estudo observando em primeiro lugar os erros médios diários obtidos e por último os erros semanais obtidos. Os autores referem que no caso mercado espanhol o modelo ARIMA necessita de cinco horas anteriores para realizar a previsão da hora seguinte. No caso do mercado californiano o modelo ARIMA necessita apenas de duas horas anteriores para realizar a previsão da hora seguinte. Na elaboração do modelo ARIMA para o mercado espanhol não foi necessária a realização de diferenciação, já para o mercado californiano foram necessárias três horas anteriores. Em conclusão o modelo ARIMA para o mercado espanhol apresenta maior volatilidade do que para o mercado

## Introdução

californiano. No mercado espanhol foi obtido em média erros de 10% e de 5% com e sem variáveis explicativas, já no mercado californiano foi de 11% sem a utilização de variáveis explicativas. Os autores indicam que os resultados obtidos são satisfatórios dado a complexidade da sucessão cronológica do preço.

Em Conejo et al. (2005) é realizado o melhoramento do modelo ARIMA pela utilização de uma transformada *wavelet* como filtro. A utilização da transformação indicada teve como objectivo a decomposição das sucessões cronológicas de forma a obter uma sucessão cronológica mais bem comportada, já que as mesmas possuem média e variância não constantes e ainda a frequente presença de *outliers*. Assim, a transformada *wavelet* modifica a série de preços num conjunto de séries construtivas, permitindo um comportamento mais estável do que nas séries originais podendo os preços ser previstos de modo mais preciso. Para a realização da previsão horária para um horizonte de 24 horas utilizando a técnica Wavelet-ARIMA, os autores adoptaram um conceito metodológico de forma a obter o modelo pretendido. O processo abordado contém três fases distintas:

1. Decompor pela transformada *wavelet* o histórico das séries de preço num conjunto de séries construtivas;
2. Introdução de um modelo ARIMA adoptado a cada uma das séries construtivas para prever as 24 horas de um dado dia;
3. Utilização da transformada *wavelet* inversa para prever os valores horários de preço a partir dos valores estimados com a utilização do modelo ARIMA.

Os autores realizaram a comparação dos resultados obtidos para esta abordagem, com os resultados obtidos apenas pela utilização de um modelo ARIMA sem variáveis explicativas. Para a averiguação da capacidade de previsão do modelo apresentado foram contabilizados erros de previsão diários e erros de previsão semanais. O caso de estudo centrou-se no mercado eléctrico espanhol utilizando dados horários de preço para o ano de 2002. Os resultados obtidos basearam-se na análise para quatro semanas distintas, analisando as quatro estações do ano para o ano de 2002. Para o Inverno e Primavera foram obtidos erros semanais na ordem dos 5%, enquanto que para o Verão e Outono foram obtidos erros semanais de aproximadamente 10% no caso do modelo com transformação *wavelet*. Em comparação com o modelo ARIMA, o modelo

ARIMA com a aplicação de transformada *wavelet* supera a precisão do mesmo para todas as semanas estudadas. Assim, os autores concluíram que a utilização de transformadas *wavelet* para tratamento das sucessões cronológicas revela de utilidade e é de grande interesse prático.

Em Garcia et al. (2005) é elaborada a previsão do MCP no mercado espanhol e californiano utilizando metodologia GARCH. Esta metodologia caracteriza-se por assumir que o erro relativo à previsão (diferença entre o valor real e o valor previsto) está correlacionado.

O método realizado para a obtenção do modelo seguiu o processo descrito de seguida:

1. Assumpção de uma classe de modelos assumindo determinada hipótese;
2. Baseado na análise de dados é identificado um tipo de modelos;
3. Estimação dos parâmetros do modelo;
4. Se o modelo validar o teste de hipóteses passar ao ponto seguinte, senão voltar ao passo 2;
5. A previsão pode ser realizada.

Para a validação e teste do modelo no caso da análise para o mercado espanhol, foram utilizados dados horários de 1 de Setembro de 1999 a 30 de Novembro do ano 2000. Já para a validação e teste do modelo na análise do mercado californiano foram utilizados dados de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro. Foi efectuada a análise para ambos os mercados durante um ano. De acordo com os resultados obtidos para a previsão, em ambos os mercados os autores constataam que o modelo GARCH supera o modelo ARIMA, apresentando o primeiro erros médios semanais no valor de 9,55% e 9,82% e o segundo erros médios semanais na ordem dos 10,79% e 11,88% para o mercado espanhol e californiano respectivamente.

Mazengia e Tuan (2008) utilizando regressão linear múltipla desenvolveram modelos para a previsão do MCP. Foram utilizadas sucessões cronológicas do mercado de electricidade nórdico (*NordPool*) e do mercado de electricidade de Ontário. Os autores referem que os resultados obtidos são satisfatórios, existindo no entanto maior precisão na previsão de preços para o mercado *NordPool* do

## *Introdução*

que para o mercado eléctrico de Ontário, apresentando erros médios semanais no valor mínimo de 2,96% e no valor de 17,30% respectivamente.

Modelos econométricos tomam como vantagem a possibilidade de transições dinâmicas complexas e aplicações em estudos financeiros. Alguns dos métodos econométricos são baseados em processos de reversão à média. Em Etheir e Mount (1988), Deng (1988) e Deng (2000) são utilizados este tipo de modelos para aplicações na previsão do preço da electricidade. A fim de observar a importância do preço da electricidade no mercado, foi elaborado um modelo que inter-relaciona a procura com a oferta por Valenzuela e Mazumbar (2001).

As abordagens baseadas em inteligência artificial ou sistemas inteligentes, mais precisamente redes neuronais artificiais e lógica *fuzzy*, são comparativamente às anteriores menos exigentes no que respeita ao tempo de computação.

A utilização de redes neuronais para a previsão do preço da electricidade é um método muito popular, podendo em determinadas circunstâncias ser mais preciso do que outros métodos. A principal razão da utilização de redes neuronais consiste na sua aptidão para aprender relações complexas através do treino. As redes neuronais são de fácil implementação e permitem uma boa precisão para interacções não lineares. A arquitectura das redes neuronais é composta pela sua camada de entrada, camada de saída e pela sua camada escondida. Em Szkuta et al. são utilizadas redes neuronais com perceptrões multi-camada. De forma a melhorar a precisão das redes neuronais ou mesmo diminuir o tempo de treino várias manipulações são realizadas às redes neuronais, tal como pré processamento dos valores de entrada e ainda tratamento de *outliers*. (Hong e Hsiao, 2002; Gao et al., 2000; Wang e Ramsay, 1988; Nicolaisen et al., 2000).

A utilização de lógica *fuzzy* contem dificuldade em realizar a previsão da electricidade. No entanto, associando as redes neuronais com a lógica *fuzzy* é possível tirar proveito das suas vantagens ultrapassando as suas limitações, sendo um exemplo a utilização do método *Adaptative Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) utilizado em Rodriguez e Anders (2004).

Relativamente a modelos não estatísticos, nomeadamente modelos de análise de equilíbrio, em Bunn (2000) é elaborada a simulação de estratégias utilizando agentes artificiais. Para os modelos de simulação um exemplo é um modelo baseado em preços marginais zonais (Bastian et al., 1999).

Com o aparecimento de mercados de electricidade, o desempenho dos mesmos foi alvo de grande estudo e análise, a fim de verificar o impacto do ambiente competitivo no sector eléctrico.

Sousa (2005), elaborou a simulação de um modelo competitivo com o objectivo de observar o comportamento das empresas produtoras intervenientes nos mercados de electricidade. Para tal, foi utilizada a abordagem em variações conjecturais que permite contemplar diversos níveis de concorrência entre empresas, adoptando comportamento de concorrência perfeita até situações de conluio, passando por equilíbrio de Cournot. Através da implementação computacional do modelo utilizando o *software* GAMS, o autor procedeu ao cálculo do preço de mercado e da quantidade produzida por cada empresa, bem como, quantidade produzida, consumida e explorada por cada mercado, precedido do lucro das empresas, excedente dos consumidores e bem-estar social, usando para tal a teoria de jogos não cooperativos para a determinação do equilíbrio de mercado.

Lagarto et al. (2010) aborda o impacto do surgimento do MIBEL no comportamento competitivo das companhias produtoras de electricidade, utilizando para tal um modelo de variações conjecturais desenvolvendo o estudo apresentado em Sousa (2005). Em primeira análise, o modelo teve como base a elaboração de um problema de optimização, nomeadamente a maximização do lucro ( $\pi_i$ ) das empresas produtoras em função da quantidade produzida por essas mesmas empresas no caso de um oligopólio assimétrico tal como descrito no problema 1.1:

$$\begin{aligned} \max_{q_{p,i}} \pi_i &= P(Q_T) \cdot q_i - C_T(q_{p,i}) \\ \text{s.a. } 0 &\leq q_{p,i} \leq Q_{\max p,i} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Em que:

$P(Q_T)$  – é o preço de mercado em €/MWh;

$Q_T$  – é a quantidade total em MWh vendida no mercado;

## Introdução

$q_i$  – é a quantidade da firma  $i$  em MWh;

$q_{p,i}$  – é a quantidade produzida em MWh pela central  $p$  que é propriedade da firma  $i$ ;

$C_T(q_{p,i})$  – é o custo total da firma  $i$  em €, em função da quantidade produzida pelas suas centrais;

$Q_{\max p,i}$  – é a capacidade máxima central  $p$  da firma  $i$  em MW.

Recorrendo às condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), pela terceira condição de KKT observou-se que a mesma podia ser escrita na forma descrita pela equação 1.2:

$$P(Q_T) + \frac{\partial P}{\partial q_{p,i}} \cdot q_i - CM_p + \lambda_{1 p,i} - \lambda_{2 p,i} = 0 \quad (1.2)$$

Em que:

$CM_p$  – é o custo marginal da central  $p$  da firma  $i$ ;

$\lambda_{1 p,i}$ ,  $\lambda_{2 p,i}$  – são os multiplicadores de Lagrange associados às restrições do problema.

Reescrevendo o rácio  $\frac{\partial P}{\partial q_{p,i}}$  obtém-se a equação 1.3:

$$\frac{\partial P}{\partial q_{p,i}} = \frac{dP}{dQ_T} \frac{dQ_T}{dq_i} \frac{dq_i}{dq_{p,i}} + \frac{dP}{dQ_T} \frac{dQ_T}{dq_{-i}} \frac{dq_{-i}}{dq_i} \frac{dq_i}{dq_{p,i}} \quad (1.3)$$

O primeiro termo da equação 1.3 representa o efeito directo no preço de fecho de mercado pela mudança de quantidade da central  $p$  da firma  $i$ . Já o segundo termo da equação 1.3, este pode ser visto como o efeito indirecto no preço de fecho de mercado.

O rácio  $\frac{dq_{-i}}{dq_i}$  da equação 1.3 significa a suposição da firma  $i$  em relação à forma como a concorrência irá mudar a sua quantidade produzida em resposta à mudança da sua própria quantidade produzida. Esta suposição ou conjectura é designada por variação conjectural da firma  $i$  e pode ser representada por  $\theta_i$ .

Pelas equações 1.4 e 1.5:

$$\frac{\partial P}{\partial Q_T} = \frac{dP}{dQ_T} \frac{dQ_T}{dq_i} \frac{dq_i}{dq_{p,i}} \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial q_{p,i}} = \frac{dP}{dQ_T} + \frac{dP}{dQ_T} \theta_i = \frac{dP}{dQ_T} (1 + \theta_i) \quad (1.5)$$

Reescrevendo a equação 1.2:

$$P(Q_T) + \frac{dP}{dQ_T} (1 + \theta_i) q_i - CM_p + \lambda_{1 p,i} - \lambda_{2 p,i} = 0 \quad (1.6)$$

A partir da equação 1.6 pode-se descrever qual é o comportamento da firma  $i$ , pelo que se  $\theta_i$  for igual a -1 significa que o seu comportamento é perfeitamente competitivo. Se  $\theta_i$  for igual a 0 a firma apresenta competitividade à Cournot. Por fim, se  $\theta_i$  for superior a 0 significa a presença de comportamentos colusivos entre firmas. Os autores puderam concluir que as firmas analisadas se mostraram mais competitivas depois da implementação do MIBEL, recorrendo para tal à análise da sua competitividade 2 meses antes e após a abertura do mesmo. Com este estudo, foi possível avaliar o funcionamento do mercado procedendo ao estudo da variação conjectural segundo a classificação dos modelos económicos indicados:

- Concorrência perfeita – existem muitas empresas pequenas a produzir um produto idêntico e cada uma é demasiado pequena para influenciar o preço de mercado. Neste caso, cada empresa confronta-se com uma curva de procura completamente horizontal (perfeitamente elástica). A receita adicional vendida é igual ao preço de mercado;
- Competitividade à Cournot – toma como pressupostos base que cada empresa numa situação de ponderação de alteração de estratégia em termos de quantidades produzidas, assume que a sua rival continuará a produzir a mesma quantidade após a sua decisão;
- Comportamentos colusivos – são caracterizados por acções independentes de um agente que concorre para os seus próprios objectivos, ainda que consciente da estratégia dos seus competidores. A empresa adopta uma estratégia lógica em busca de maior lucro.

No entanto, no mercado de electricidade, as suas características levam com regularidade à existência de oligopólios. Tal facto, deve-se à existência de poucos vendedores em comparação com o número de compradores, podendo assim cada empresa influenciar individualmente o mercado, apesar de o ser de forma menos acentuada do que no caso extremo de monopólio.

## *Introdução*

A experiência de países que liberalizaram os seus mercados eléctricos mostrou que a assumpção de que os seus mercados vão naturalmente produzir um resultado competitivo não é sempre justificada, devendo-se tal facto à dificuldade de definir o modelo de mercado. O estudo da competitividade dos agentes produtores nos mercados de electricidade é de grande importância também para a detecção de poder de mercado. O poder de mercado é tipicamente definido pela capacidade de alterar os preços dos níveis competitivos (Twomey, 2004).

A presente dissertação tem como base a modelação e previsão horária da variação conjectural pela utilização de análise de sucessões cronológicas, utilizando valores prévios de variação conjectural para fins de modelação e estudo do nível competitivo no MIBEL.

### **1.4 – Estrutura do Texto**

A presente dissertação encontra-se estruturada ao longo de cinco capítulos distintos.

O presente capítulo aborda o enquadramento, motivação e estado da arte, realizando uma apresentação do presente trabalho.

No segundo capítulo é abordado o conceito de mercados de energia eléctrica, focalizando o estudo do MIBEL, descrevendo também o processo de reestruturação do sector eléctrico a nível global, centrando-se no entanto principalmente na Península Ibérica.

No terceiro capítulo é descrita a metodologia utilizada, descrevendo os conceitos referentes à análise de sucessões cronológicas.

O quarto capítulo centra-se na apresentação dos diferentes conjuntos de dados utilizados na realização deste trabalho, abordando-se a análise de casos de estudo, resultados obtidos e o processo utilizado para modelação e previsão.

Por fim, no quinto capítulo apresentam-se algumas conclusões e perspectivas de trabalho futuro.





---

## **Capítulo 2**

---

# **Mercados de Energia**

## **Eléctrica**

*No presente capítulo é abordada a concepção de Mercados de Energia Eléctrica, incidindo na reestruturação do sector eléctrico na Península Ibérica e o surgimento do MIBEL.*



## **2 – Mercados de Energia Eléctrica**

A concepção de mercado de energia eléctrica começou a ser abordada somente nas últimas décadas, em parte devido às características próprias da electricidade, bem como as condicionantes relativas à concorrência do sector.

Com a electricidade a revelar-se um bem essencial para os seus consumidores, a criação de mercados de energia eléctrica é de extrema complexidade não sendo estabelecido qual o modelo mais adequado para esse fim.

A presente dissertação foca-se no estudo do MIBEL, sendo o mesmo descrito em mais detalhe de seguida.

### **2.1 – Reestruturação do Sector Eléctrico**

Nas últimas décadas do século XX o sector eléctrico mundial foi alvo de grandes evoluções no sentido de introduzir concorrência neste sector, que tradicionalmente era considerado como um monopólio natural.

Antes da reestruturação do sector eléctrico, o mesmo encontrava-se verticalmente integrado de forma a otimizar o seu funcionamento. Neste âmbito, uma empresa prestava os serviços de geração, transmissão e distribuição de energia eléctrica aos diversos consumidores.

Uma das razões mais importantes apresentada como justificação da liberalização do sector eléctrico, baseia-se na extinção das condições que o permitiam classificar como monopólio natural, especialmente ao nível da produção de energia eléctrica (Sousa, 2005).

A reestruturação do sector eléctrico passou pela implementação de mecanismos de mercado, assentes na desverticalização do sector, criando assim várias empresas produtoras, entidades fornecedoras de serviços e comercializadores. Desta forma, surgiu a inclusão de concorrência em diversas áreas do sector, visando que nenhuma entidade detivesse posições dominantes de mercado, liberalizando os segmentos de produção e comercialização do sector eléctrico.

A reforma do sector eléctrico consistiu assim, em linhas gerais, na separação vertical das actividades potencialmente competitivas (produção e comercialização) das áreas reguladas (transporte e distribuição), promovendo a liberalização das primeiras e a re-regulação das segundas (Sousa, 2005).

O principal objectivo da reforma do sector eléctrico consistiu no aumento da eficiência económica, através da minimização dos custos de fornecimento de energia eléctrica e da garantia que os preços dos consumidores seguem os custos associados. A forma mais efectiva para estabelecer incentivos sustentáveis à diminuição de custos e preços é obtida pela existência de um mercado competitivo (Sousa, 2005).

A existência de mercados competitivos tende a uma geração de energia mais eficiente, onde as inovações tecnológicas assumem especial relevância, o que contribui para a existência de preços e custos mais baixos, e ainda o incremento da diversidade da oferta.

A concepção assumida para a reestruturação do sector eléctrico assentou assim na transição de um monopólio natural para um mercado concorrencial.

- **Evolução do Processo de Reestruturação**

No que diz respeito ao enquadramento histórico da reestruturação do sector eléctrico, em 1978, foi adoptada nos Estados Unidos a *Public Utility Regulatory Policies Act* (PURPA) que estabelecia a obrigatoriedade de aquisição por parte das empresas eléctricas, da electricidade produzida por “produtores qualificados”, na maioria co-geradores e pequenos produtores independentes (Sousa, 2005).

Posteriormente em 1982, foi estabelecida no Chile uma lei que visava a introdução de alguma competição nos mercados de energia eléctrica, através da possibilidade concedida aos grandes consumidores de escolherem livremente o seu fornecedor de energia eléctrica e com eles negociarem os preços praticados (Catalão, 2009; Sousa 2005).

Mais tarde, na década de 90, teve lugar uma segunda fase da reestruturação do sector a nível mundial, com o estabelecimento de mecanismos explícitos de

mercado para o despacho das unidades de produção e para a formatação do preço da electricidade, permitindo assim a competição entre produtores. A primeira implementação deste sistema evidenciou-se em 1990 com a criação da bolsa de energia eléctrica de Inglaterra e Gales (Sousa, 2005). Importantes reestruturações no sector eléctrico nos anos 90 ocorreram também em países como a Argentina, Austrália, Nova Zelândia e Estados Unidos da América (Tomé, 2009).

Em 1991 entrou em funcionamento a bolsa da Noruega, sendo a mesma estendida à Suécia em 1996, dando origem à *NordPool*, que inclui hoje também a Finlândia e a Dinamarca. Ainda em 1996, foi estabelecida uma bolsa voluntária para a transacção de energia eléctrica na Nova Zelândia.

Em 1997, surge a criação da bolsa da Austrália denominada por *The National Electricity Market of Australia* pela fusão da *Victoria Pool*, em funcionamento desde 1994, com a *New South Wales Pool*, estabelecida como bolsa diária desde 1996 (Sousa, 2005).

No ano seguinte surge em funcionamento a bolsa em Espanha e nos Estados Unidos, nomeadamente na Califórnia, bem como, a *Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection (PJM)* (Sousa, 2005).

Já em 1999, o início de operação do mercado organizado de energia na Holanda surgiu com a *Amsterdam Power Exchange*. Ainda em 1999, teve lugar a reestruturação da bolsa de Inglaterra e Gales conhecida por *New Electricity Trading Arrangement*, sendo no entanto apenas implementada em Março de 2001 (Sousa, 2005).

Nos anos finais do século XX parte dos países da UE já dotavam de políticas implementadas com o fim de reestruturar o seu sector eléctrico ou políticas ainda em fase de implementação. As alterações estruturais do sector eléctrico destes mesmos países, foram realizadas apoiando-se essencialmente em Directivas Europeias ao Mercado de Electricidade. De acordo com as Directivas Europeias, os diferentes Estados-membros teriam obrigatoriamente de adoptar medidas com o fim da liberalização dos seus mercados. As alterações estruturais realizadas passaram principalmente pelo melhoramento das ligações entre os diferentes Estados-membros, em resposta aos incentivos da Comissão Europeia.

As medidas implementadas pela Comissão Europeia tiveram como objectivo central a criação de um mercado europeu de energia eléctrica.

- **Directivas Europeias Aplicadas**

Nas décadas mais recentes a UE com o objectivo de proceder a alterações ao sector eléctrico, realizou várias Directivas Europeias para esse fim.

A primeira fase de organização do mercado interno do sector eléctrico europeu ocorreu em 1990, em primeiro lugar com a publicação da Directiva 90/547/CEE, de 29 de Outubro, referente ao trânsito de electricidade nas grandes redes, e da Directiva 90/377/CEE, de 29 de Junho a fim de assegurar a transparência dos preços pagos pelo consumidor final de gás e electricidade (Tomé, 2009).

No contexto da criação de um mercado único europeu, a Comissão Europeia a fim de dinamizar o processo de liberalização do sector eléctrico procedeu à publicação da Directiva 96/92/CE de 19 de Dezembro de 1996 – Mercado Interno de Electricidade (MIE). A presente Directiva visou três aspectos importantes de liberalização, nomeadamente a concorrência na produção, o acesso de terceiros às redes de transporte e a separação contabilística das empresas verticalmente integradas.

A concepção do MIE visa a promoção de competitividade e a eliminação das barreiras existentes às transacções comerciais fronteiriças assegurando que os consumidores possam escolher livremente o seu fornecedor de energia eléctrica. Neste âmbito, a energia deverá, tanto quanto possível, circular entre Estados-membros (Catalão, 2006).

Em 2001, a Comissão Europeia apresentou uma proposta de alteração da Directiva 96/92/CE, com o fim de acelerar a abertura do MIE, surgindo assim a publicação da Directiva 2003/54/CE de 26 de Junho de 2003 (Europeia, 2003). A presente Directiva visa eliminar a figura de comprador único e exige que os Estados-membros considerem como elegíveis, a partir de 1 de Julho de 2004, todos os consumidores não domésticos e a partir de 1 de Julho de 2007, todos os restantes consumidores, sendo necessário o acesso livre às redes de transporte e distribuição. Desta forma, foram estabelecidos mecanismos de compensação de

fluxos transfronteiriços de electricidade, bem como, princípios a adoptar relativamente às tarifas para o transporte e à atribuição das capacidades de interligação entre as diversas redes de transporte nacionais.

Surge assim, a possibilidade de o fornecedor poder ser um produtor para os consumidores de maior dimensão, ou de poder ser um comercializador que compra a energia eléctrica por grosso e a vende a retalho (Catalão, 2006).

A possibilidade de escolha do fornecedor promove a existência de mercados concorrenciais, contribuindo desta forma para investimentos em meios de produção, redes de transporte e redes de distribuição, promovendo um melhor desempenho do sector eléctrico.

Posteriormente a 13 de Julho 2009, a Comissão Europeia com o lançamento da Directiva 2009/73/CE, integrando o Terceiro Pacote Energético, objectiva o aumento da concorrência no sector, a existência de uma regulamentação eficaz e o incentivo ao investimento, em benefício dos consumidores de electricidade e gás natural. O Terceiro Pacote Energético estabelece assim medidas visando a consolidação de um mercado que funcione em benefício de todos os consumidores, garantindo em simultâneo um fornecimento de energia mais seguro, competitivo e sustentável na UE. Neste pacote são estabelecidas medidas no que diz respeito ao procedimento de certificação do operador de rede de transporte, para a avaliação das condições de separação das actividades do sector energético. Relativamente à actividade de distribuição, os operadores de rede de distribuição que pertençam a empresas verticalmente integradas e que sirvam um número igual ou superior a cem mil clientes passam a ter que elaborar um programa de conformidade que contemple as medidas adoptadas para excluir comportamentos discriminatórios. São ainda implementadas medidas reforçando o direito dos consumidores, através da introdução de mecanismos que asseguram a mudança de comercializador num período não superior a três semanas e sem custos devidos pelo acto de mudança do consumidor, bem como o tratamento das reclamações pelas entidades administrativas com competências no sector (Europeia, 2009; República, 2011).

### **2.1.1 – Evolução em Portugal**

Em Portugal no ano de 1975 deu-se a nacionalização do sector eléctrico português, associando todas as empresas ligadas à produção, transporte e distribuição, dando origem a 1976 à criação da empresa denominada de Electricidade de Portugal, agora conhecida por Energias de Portugal (EDP) (EDP, 2012). O sector eléctrico português consistia numa estrutura verticalmente integrada funcionando como um monopólio.

Mais tarde em 1988, com a publicação do Decreto-Lei nº 189/88, de 27 de Maio, ocorreu uma modificação importante na legislação aplicada ao sector, criando o conceito de Produção em Regime Especial (PRE), incentivando a produção independente usando fontes de energia renovável ou cogeração.

Em 1995, surge a primeira reforma no sector eléctrico português com a publicação do Decreto-Lei nº 182/95, ocorrendo a reestruturação e a privatização parcial (separação das actividades de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica) da empresa pública monopolista e verticalmente integrada EDP.

Com a primeira reforma, o sector eléctrico português foi alterado significativamente, ficando estruturado num sistema de serviço público e num sistema a ser explorado através do mercado. A evolução do Sistema Eléctrico Nacional (SEN) deu origem ao Sistema Eléctrico Público (SEP) e ao Sistema Eléctrico Independente (SEI), sendo ambos regulados por uma entidade independente, denominada actualmente por Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). O SEP passou a incluir todos os produtores, clientes e distribuição vinculados, e ainda a Rede Nacional de Transporte (RNT). Por outro lado, o SEI passou a abranger os produtores, distribuidores e clientes do Sistema Eléctrico Não Vinculado (SENV) e a PRE (ERSE, 2004).

A ERSE passa a desempenhar um papel fundamental na coexistência entre o SEP e o SENV, regulando as actividades de transporte e distribuição de energia eléctrica no âmbito do SEP, e as relações comerciais entre o SEP e o SENV. O SEP baseia-se numa lógica centralizada, onde as transacções de energia eléctrica são realizadas a um preço regulado. Por outro lado, o SENV é regido pela lógica de mercado, onde os agentes não têm garantia prévia de rentabilidade, visto que,

estão sujeitos às leis da oferta e da procura de energia eléctrica que determinam o equilíbrio de mercado (Catalão, 2006).

No ano 2000, surge uma nova fase de privatização da EDP, abdicando o Estado Português da grande maioria do capital da empresa, passando a deter somente 30% do capital (Catalão, 2006). Nesta, ocorre a separação da concessionária da RNT, a Rede Eléctrica Nacional, S.A. (REN) do grupo EDP.

A REN assegura o transporte de energia eléctrica e a gestão do SEP, tratando-se do único comprador dos produtores vinculados (Catalão, 2006). O relacionamento comercial entre os produtores vinculados e a REN era realizado mediante Contratos de Aquisição de Energia (CAE). No entanto, no ano de 2006 a necessidade de término dos CAE ocorreu tendo em conta a abertura do MIBEL. Com o aparecimento e início do MIBEL foi criado um mecanismo de compensação denominado por Custos de Manutenção do Equilíbrio Contratual (CMEC) em vigor até 2017, de modo a compensar os produtores vinculados pela cessação dos CAE. Passado esse período, os produtores portugueses irão depender unicamente do próprio mercado.

Em 2006 também teve início a liberalização do mercado de electricidade de baixa tensão, enquanto se procedeu à organização do sector nas actividades de produção (tanto em regime ordinário como em regime especial), de transporte e de comercialização (Tomé, 2009).

Posteriormente a 1 de Julho de 2007 surge a abertura do MIBEL integrando o mercado eléctrico português e o mercado eléctrico espanhol.

## **2.1.2 – Evolução em Espanha**

Até ao ano de 1995 o sector eléctrico espanhol encontrava-se organizado em termos de um agregado de empresas verticalmente integradas, operando em áreas geográficas específicas. Apesar da existência de várias empresas, não se verificava competição no sector e os clientes estavam assim fisicamente e comercialmente ligados à empresa concessionária da sua região.

No entanto, em 1995 foi publicada uma nova legislação com o objectivo de promover a reestruturação do sector eléctrico espanhol, passando o mesmo a ser

organizado em termos de um sistema integrado e de um sistema independente. A legislação aprovada continha como tópico fundamental, a separação entre a produção de energia eléctrica e a sua distribuição (Tomé, 2009). Com a mudança na estrutura do sector eléctrico espanhol surge assim a criação de uma entidade reguladora, a *Comissión Nacional de Energia* (CNE). Apresentando o modelo assumido muita contestação, em Novembro de 1997, foi aprovada uma nova lei, a *Ley 54 del Sector Eléctrico*, iniciando-se assim a liberalização do sector com a criação do mercado de electricidade espanhol, que arrancou posteriormente a 1 de Janeiro de 1998. A aplicação da lei indicada efectuou alterações profundas no funcionamento do sector eléctrico espanhol, promovendo a desverticalização do mesmo.

O modelo do sector eléctrico espanhol passou assim a compreender a existência de dois sistemas: o sistema regulado e o sistema liberalizado.

No sistema regulado, os consumidores adquirem electricidade dos diferentes distribuidores, estando o seu preço sob o regime de tarifas reguladas. Em semelhança às empresas do sector eléctrico do transporte e distribuição de energia eléctrica também têm a sua actividade regulada.

Já no caso do sistema liberalizado, é adquirida electricidade recorrendo a transacções em bolsa.

O funcionamento do mercado de electricidade espanhol passou assim a funcionar de acordo com os seguintes processos:

- Mercado diário;
- Resolução de congestionamentos e serviços;
- Mercado intra-diário;
- Gestão do sistema em tempo real.

A actuação dos produtores no sector eléctrico espanhol poderia ser efectuada em regime especial ou regime ordinário.

Os produtores em regime ordinário procederiam à venda da sua produção através do mercado diário. Por outro lado, os produtores em regime especial, tratam-se dos produtores detentores de fontes de energia renovável com uma potência instalada de 50 MW ou cogeração. No seu caso, a sua produção poderia

ser vendida na *pool* espanhola ou ainda pela aplicação da tarifa de referência do sistema espanhol.

Em Espanha desde 2003, tornou-se possível aos consumidores a escolha do seu comercializador de electricidade (Tomé, 2009).

Posteriormente, a 1 de Julho de 2007 surge o MIBEL, sobrepondo-se ao mercado eléctrico espanhol de electricidade baseando-se no funcionamento do mesmo.

## **2.2 – Mercado Ibérico de Electricidade**

Actualmente, verifica-se o incentivo da UE para a criação de mercados regionais, visando o alargamento para um mercado europeu de energia. Desta forma, com o surgimento do MIBEL a indústria de electricidade da Península Ibérica pode interagir com o resto da Europa, contribuindo com um marco importante para o cumprimento do objectivo da UE na criação do MIE.

Com o surgimento do MIBEL, os produtores constataram o aparecimento novas oportunidades de negócio em virtude do alargamento do mercado e consequente aumento de potenciais clientes (Sousa, 2005). Por outro lado, os consumidores passaram a estar susceptíveis a uma maior diversidade de oferta, podendo eventualmente contribuir para a descida dos preços de energia eléctrica.

### **2.2.1 – Desenvolvimento do Mercado**

O MIBEL surge após o culminar das diversas negociações realizadas entre os governos de Espanha e Portugal.

No dia 14 de Novembro de 2001 foi assinado um protocolo entre os governos de Espanha e Portugal para a criação do MIBEL, Mercado Ibérico de Electricidade, onde foi estabelecida a data de 1 de Janeiro de 2003 para o início do funcionamento do MIBEL.

Posteriormente, em Outubro de 2002, com a XVIII Cimeira Luso-Espanhola, foi adiado o início de funcionamento do MIBEL.

A 8 de Novembro de 2003, com a XIX Cimeira Luso-Espanhola foram definidas as condições necessárias para a criação do MIBEL.

Mais tarde, a 20 de Janeiro de 2004 foi assinado um Acordo para a Constituição de um Mercado Ibérico de Energia Eléctrica, a ser aplicado a título provisório desde 20 de Abril de 2004. No entanto, a 1 de Outubro de 2004 com o Acordo de Santiago de Compostela entre os governos de Espanha e Portugal o arranque a 20 de Abril foi impedido. Neste acordo, foi determinado que o arranque do MIBEL deveria se processar até 30 de Julho de 2005. Apesar disso, o arranque do MIBEL não foi possível dentro do prazo estabelecido.

Posteriormente, na XXI Cimeira Luso-Espanhola efectuada a 18 e 19 de Novembro de 2005 em Évora, os governos de Espanha e Portugal, assumiram como prioridade o arranque do mercado de derivados do MIBEL, sendo fixada a data para Julho de 2006. O arranque do mercado de derivados do MIBEL dá-se a 3 de Julho de 2006 cumprindo a data perspectivada (Lagarto, 2010).

Na XXII Cimeira Luso-Espanhola decorrida a 24 e 25 de Novembro de 2006 em Badajoz, estabeleceu-se o funcionamento do mercado *spot* (diário e intra-diário), tendo um processo coordenado de gestão de capacidade de interligação através de *market splitting* e leilões explícitos. Em consequência, surge a entrada em serviço do MIBEL a 1 de Julho de 2007 (Lagarto, 2010).

Posteriormente, na XXIII Cimeira Luso-Espanhola realizada a 18 e 19 de Janeiro em Braga, tendo em vista acelerar o desenvolvimento do MIBEL, foi assinado o Acordo de Revisão do Acordo de Santiago de Compostela. Neste acordo, foi estabelecida a estrutura base do Operador de Mercado Ibérico (OMI) baseada em duas sociedades gestoras de participações sociais, com sedes em Portugal e Espanha.

Na XXIV Cimeira Luso-Espanhola efectuada a 22 de Janeiro de 2009 em Zamora, foi acordada a constituição definitiva do OMI através da interligação dos operadores Operador de Mercado Ibérico de Energia, pólo Português (OMIP) e *Operador del Mercado Ibérico de Energia, pólo Espanhol* (OMIE) até 15 de Junho de 2009.

Por fim, a 10 de Novembro de 2011 em Madrid ocorreu a primeira reunião do Conselho de Administração comum às sociedades gestoras do OMI, do

mercado *spot* (OMIE) e do mercado a prazo (OMIP), concretizando-se uma importante etapa na concretização do OMI.

### **2.2.2 – Funcionamento do Mercado**

O MIBEL trata-se de um mercado de electricidade comum a Espanha e Portugal com estrutura baseada num modelo misto, onde a contratação de energia eléctrica no mercado ibérico pode ser realizada por intermédio de um mercado *spot* (diário e intra-diário), de um mercado a prazo e ainda por um mercado de contratação bilateral livre.

O MIBEL contempla ainda negociação atendendo a leilões de energia e leilões de capacidade virtual.

O modelo de mercado do MIBEL baseia-se na existência de mercados organizados e mercados não organizados.

Os mercados organizados dizem respeito ao mercado *spot* e ao mercado a prazo. Por outro lado, nos mercados não organizados é realizada a transacção de energia eléctrica pela execução de contratos bilaterais.

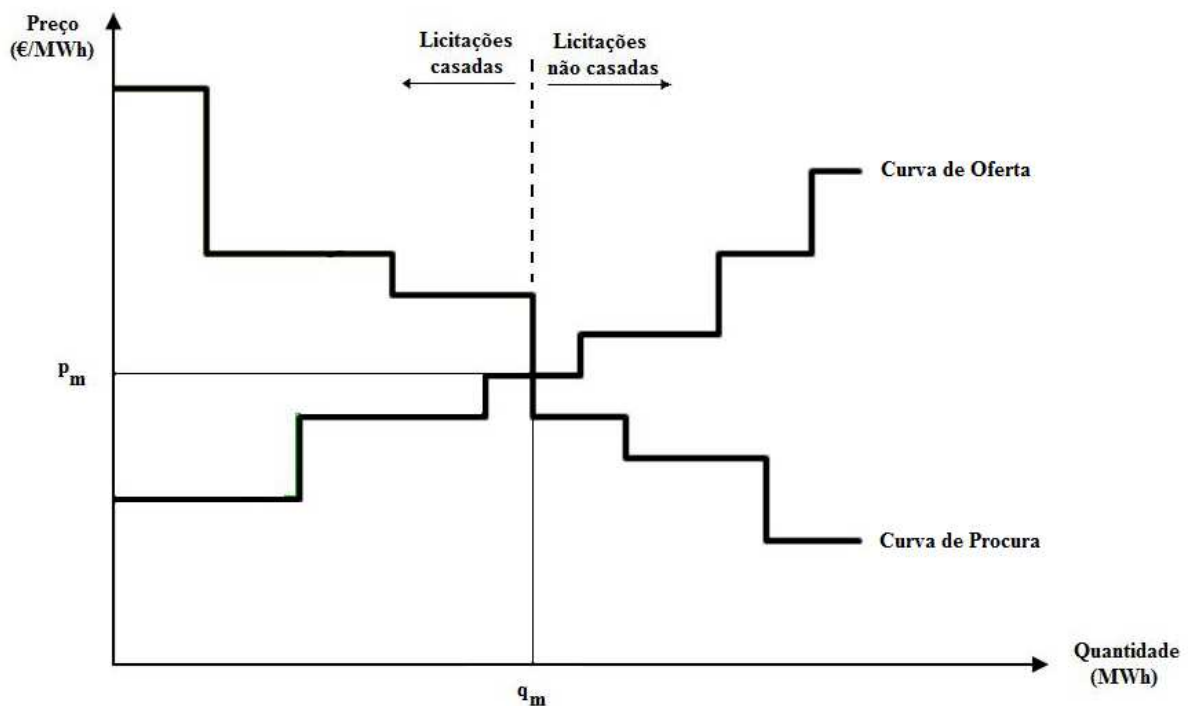
No mercado *spot* realizam-se transacções fruto da participação dos diferentes agentes nas diferentes sessões do mercado diário, do mercado intra-diário e através da aplicação dos procedimentos de operação técnica do sistema, tais como restrições técnicas e gestão de desvios.

No mercado diário são efectuadas transacções de energia eléctrica com entrega física para o dia seguinte. Esta negociação é realizada através de licitações de venda e de compra de energia eléctrica (atribuindo o preço e a quantidade de energia eléctrica) pelos diversos agentes que participam no mercado. Este processo é realizado para cada uma das 24 horas do dia, sendo a liquidação realizada nessas horas do dia seguinte.

Em paralelo com o mercado diário existe um mercado intra-diário ou de ajustes, que tem por objectivo, mediante a apresentação de ofertas de venda e de compra por parte dos agentes de mercado, atender aos ajustes sobre o programa diário definido (OMIE, 2012). Este mecanismo permite aos agentes de mercado comprar ou vender certas quantidades de energia eléctrica, tendo assim a

possibilidade de cobrir os desvios de produção ou consumo previstos face à produção ou consumo perto do tempo real de operação. O mercado intra-diário é constituído por seis sessões, tendo a primeira a duração de 1 hora e 45 minutos e as restantes a duração de 45 minutos (Tomé, 2009). Este mercado, permite a participação de todos os agentes, independentemente do método de negociação utilizado previamente, quer por mercado diário, mercado a prazo ou contratos bilaterais físicos.

O preço de fecho de mercado num mercado *spot* é estabelecido pela licitação de oferta casada mais cara, revelando-se como sendo o preço ao qual todas as licitações de oferta casadas serão pagas nessa determinada hora do dia seguinte. As licitações de oferta podem ser casadas totalmente ou parcialmente, determinando assim se a quantidade de energia das mesmas será transaccionada na totalidade ou apenas parcialmente. A curva de oferta corresponde à globalidade das licitações de venda de todos os produtores ordenadas por ordem crescente de preço, já a curva de procura passa pela agregação das licitações de compra por ordem decrescente de preço. O preço correspondente à licitação de oferta mais cara define preço de fecho de mercado ( $p_m$ ) e a quantidade de energia transaccionada ( $q_m$ ) é definida pela intersecção entre a curva de procura e a curva de oferta, tal como pode ser observado na Figura 2.1.



**Figura 2.1-** Curvas de oferta e procura num mercado *spot*.

O mercado a prazo trata-se de um mercado de derivados, sendo um mercado organizado em contratos de compra e venda de electricidade a prazo, quer físicos, quer financeiros, englobando os contratos de futuros (ERSE, 2012).

O MIBEL permite a contratação bilateral física, possibilitando a negociação livre e directa entre as entidades produtoras e as entidades comercializadoras ou distribuidoras, não sendo necessário recorrer à *pool*. As negociações contratuais económicas são da inteira responsabilidade das entidades intervenientes, sendo necessário apenas a comunicação aos operadores de sistema das condicionantes técnicas estabelecidas.

A ERSE, entidade reguladora em Portugal dispõe de competências no que diz respeito à fixação de tarifas, bem como no estabelecimento das regras regulatórias do sector eléctrico nacional. A sua congénere em Espanha a CNE contem funções menos abrangentes sendo consultada para a fixação de tarifas.

A gestão dos mercados organizados do MIBEL é realizada por duas entidades responsáveis ou operadores de mercado: o OMIE e o OMIP. Estes operadores serão futuramente integrados e darão origem a um operador de mercado único, denominado por OMI.

O OMIE é a entidade responsável pela gestão do mercado diário e intra-diário, enquanto que o OMIP é a entidade responsável pela gestão do mercado a prazo.

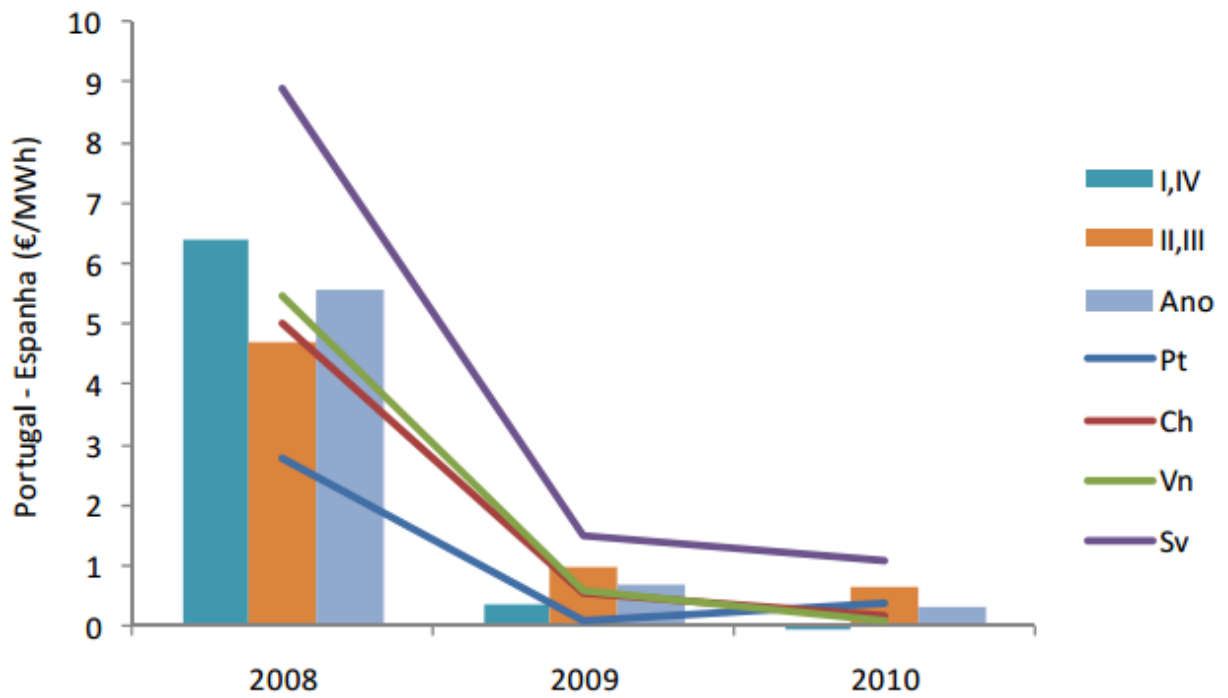
A operação do sistema divide-se em duas zonas geográficas distintas, Portugal e Espanha. Os operadores do sistema são as entidades concessionárias das redes de transporte REN em Portugal e *Red Eléctrica de España* (REE) em Espanha. Cada um dos operadores de sistema é responsável pela operação do sistema da sua zona, e ainda da coordenação das interligações com a sua zona. Estes operadores têm como função a validação dos resultados obtidos no mercado, gerindo em tempo real a contratação de serviços de sistema e os desvios dos programas contratados. O mercado de serviços de sistema do MIBEL é gerido pelos operadores de sistema REN e REE.

Um dos principais problemas com que os operadores de sistema se deparam é a resolução de congestionamentos.

No mercado diário e intra-diário a resolução de congestionamentos, nas horas em que a capacidade de interligação das linhas de transmissão entre Portugal e Espanha é excedida é da mútua responsabilidade de ambos os operadores de sistema. A sua resolução é efectuada pela coordenação do mecanismo de *market splitting* e leilões explícitos, do qual resultam preços diferenciados para a zona portuguesa e para a zona espanhola nas horas de congestionamento. A criação destas duas zonas distintas requer que seja realizado um novo despacho, provocando a alteração do conjunto de unidades de produção que estavam programadas no despacho. Em consequência a zona exportadora vê o seu preço baixar, ao contrário da zona importadora que vê o seu preço aumentar (Tomé, 2009).

No ano de 2007, os preços horários do mercado diário mostravam uma tendência de redução da diferenciação entre o período de ponta e o período de super vazio. No entanto, a integração de preços horários entre Portugal e Espanha apresentava uma elevada percentagem de horas com separação de preços e um diferencial de preços significativo devido ao *market splitting*. Com a evolução do mercado diário verificou-se uma importante redução do número de horas de separação de mercados (*market splitting*) e o respectivo diferencial de preços. Tratando-se a Espanha de um mercado de maior dimensão, é de se esperar que futuros desenvolvimentos na capacidade de interligação ou na estrutura de produção contribuam para aproximar os preços de Portugal do que se passa em Espanha, nomeadamente na estrutura de preços por período tarifário (ERSE, 2011).

Na Figura 2.2 pode-se observar o diferencial de preços horários entre Portugal e Espanha no mercado diário entre 2008 e 2010, devido à separação de mercados para períodos trimestrais distintos (I, IV e II, III), em todo o ano e ainda nas horas de vazio ( $V_n$ ), nas horas de super vazio ( $S_v$ ), horas de cheia ( $Ch$ ) e horas de ponta ( $P_t$ ).



Fonte: ERSE (2011)

**Figura 2.2-** Diferencial de preços horários entre Portugal e Espanha no mercado diário devido à separação de mercados.



---

## Capítulo 3

---

# Metodologia de Previsão

*Neste capítulo é descrita a metodologia de previsão utilizada. Apresentam-se os tipos de modelos utilizados e as suas características. É apresentada ainda, a ferramenta utilizada para efectuar modelação e previsão.*



### **3 – Metodologia de Previsão**

Nas últimas décadas, várias têm sido as metodologias utilizadas para previsão, desde a aplicação de modelos estatísticos, como análise de sucessões cronológicas, métodos econométricos e sistemas inteligentes, até modelos não estatísticos, usualmente destinados a modelos de simulação ou modelos mímicos (Li et al., 2006).

Na presente dissertação foi abordada como metodologia de previsão a análise de sucessões cronológicas sendo descrita em detalhe de seguida.

#### **3.1 – Análise de Sucessões Cronológicas**

A metodologia para análise, descrição e previsão de uma sucessão cronológica é um método sofisticado de extrapolação de dados, que se caracteriza por uma variável poder ser explicada apenas pelo tempo e pelas suas realizações anteriores (Magalhães, 1993).

Uma sucessão cronológica é um conjunto de observações tomadas em instantes de tempo determinados em geral com intervalos equidistantes (horas, dias, semanas, meses, trimestres, anos, etc.) (Magalhães, 1993).

Matematicamente uma sucessão cronológica pode ser definida da seguinte forma:

$$y_1, y_2, \dots, y_t, \dots, y_T \quad (3.1)$$

Em que:

$y_t$  – valor observado no instante  $t$ ;

$T$  – é o número total de observações.

Sucessões cronológicas são realizações de processos subjacentes de geração de dados ocorrendo em pontos regulares no tempo. Desta forma, as sucessões cronológicas têm componentes determinísticas e estocásticas identificáveis (Yaffee e McGee, 2000).

Se um processo for estocástico, cada observação pode ser vista como uma variável aleatória (Yaffee e McGee, 2000). O conceito de processo estocástico generaliza o de variável aleatória, fazendo esta depender do tempo. Na perspectiva estocástica, uma sucessão cronológica  $y_1, y_2, \dots, y_t, \dots, y_T$ , representa assim uma realização de uma sucessão de variáveis aleatórias.

As sucessões cronológicas que não são dirigidas por processos estocásticos, podem ser dirigidas por processos determinísticos. Os processos determinísticos, referem-se a fenómenos que podem ser calculados de forma exacta, apoiando-se no uso de fórmulas matemáticas conhecidas (Yaffee e McGee, 2000).

Uma das razões inerentes ao estudo de sucessões cronológicas é a descoberta de comportamentos sistemáticos na respectiva sucessão, a fim de permitir a construção de um modelo matemático que explique o comportamento passado da mesma. Com este tipo de modelo, pretende-se que o comportamento passado de uma sucessão cronológica permita inferir algo acerca do comportamento futuro dessa mesma sucessão (Magalhães, 1993).

A análise de sucessões cronológicas trata-se de um método de previsão quantitativo, utilizando dados históricos procurando projectar no futuro padrões de comportamento que se identificam nos dados do passado. Tratando-se de um método quantitativo considera-se o cumprimento da hipótese de estabilidade. A hipótese de estabilidade estabelece que no futuro prevalecerão as condições que determinaram no passado a evolução da variável em estudo.

Os modelos de sucessões cronológicas são úteis quando não se possui um modelo causal para uma dada variável, pois permite explicar uma variável somente pelo tempo e pelas suas realizações anteriores (Magalhães, 1993).

Na presente dissertação será aplicada a análise univariada de sucessões cronológicas, tratando-se assim de um método não causal, pois não procura relacionar a variável a prever com outras variáveis que possam explicar o seu comportamento. Desta forma, apenas será considerada uma sucessão cronológica para a previsão.

Os métodos de modelação associados à análise de sucessões cronológicas, podem ser classificados da seguinte forma (Yaffee e McGee, 2000):

- I. Métodos de alisamento, tais como médias móveis e alisamento exponencial;
- II. Métodos auto-regressivos;
- III. Métodos clássicos de decomposição;
- IV. Metodologia Box-Jenkins.

### **3.1.1 – Componentes de uma Sucessão Cronológica**

As sucessões cronológicas são constituídas basicamente por três componentes, nomeadamente tendência, sazonalidade e ciclicidade.

A tendência reflecte uma evolução global a longo prazo do sentido de crescimento ou decrescimento da sucessão cronológica. Esta pode ser resultado de um processo aleatório assumindo uma perspectiva estocástica, ou determinista, podendo-se tratar do resultado de uma função matemática no tempo (Yaffee e McGee, 2000).

Quanto à sazonalidade, esta representa uma flutuação com periodicidade fixa. Caracteriza padrões regulares de uma sucessão cronológica (Yaffee e McGee, 2000). Uma mesma sucessão cronológica pode possuir mais do que uma sazonalidade. Os períodos de variação da sazonalidade são designados por estações. Esses períodos podem ser anuais, mensais, semanais ou até mesmo diários.

Por fim, a ciclicidade ou componente cíclica de uma sucessão cronológica reflecte movimentos oscilatórios mais ou menos regulares de médio prazo. Estes movimentos não contêm periodicidade fixa e só são detectáveis para sucessões cronológicas de longa dimensão.

Para além da tendência, sazonalidade e ciclicidade, surge ainda a componente errática associada ao modelo elaborado segundo a análise de sucessões cronológicas (Yaffee e McGee, 2000).

### 3.1.2 – Tipos de Modelos Utilizados

Na presente dissertação foram utilizados como metodologias base para a realização do processo de modelação a fim de efectuar a previsão, a utilização de modelos ARIMA e de modelos de alisamento exponencial.

- **Modelos ARIMA**

Os modelos ARIMA são assentes em processos estocásticos. Uma sucessão cronológica diz-se estacionária se o processo estocástico que gera a sucessão for invariante em relação ao tempo. Os modelos ARIMA assumem que a sucessão cronológica em análise é uma sucessão não estacionária e que a mesma se torna estacionária por diferenciação. Tal facto constitui uma grande vantagem pois grande número de sucessões cronológicas são não estacionárias (Magalhães, 1993). Na presente dissertação foram considerados modelos ARIMA com e sem sazonalidade.

Os modelos ARIMA sem sazonalidade são representados da seguinte forma:

$$\text{ARIMA (p,d,q)} \quad (3.2)$$

Em que:

p – representa a ordem do processo AR;

d – representa a ordem do processo de diferenciação;

q – representa a ordem do processo MA.

O operador *lag* (L) refere-se ao valor que uma dada variável assume no instante t-1 ( $y_{t-1}$ ), para o instante t da mesma variável ( $y_t$ ).

Pelo que,  $L(y_t) = y_{t-1}$  (Yaffee e McGee, 2000).

Matematicamente os modelos ARIMA sem sazonalidade podem ser descritos da seguinte forma:

$$\emptyset(L)(1 - L)^d Y_t = \theta(L)e_t \quad (3.3)$$

Onde:

$\phi(L)$  – polinómio auto-regressivo não sazonal de ordem  $p$ ;

$\theta(L)$  – polinómio de médias móveis não sazonal de ordem  $q$ ;

$Y_t$  – trata-se da sucessão cronológica univariada em estudo;

$e_t$  - erro gerado por um processo de ruído branco;

$L$  – operador *lag*.

Já os modelos ARIMA com sazonalidade são definidos da seguinte forma:

$$\text{ARIMA}(p,d,q)(P,D,Q)_s \quad (3.4)$$

Em que:

$p$  – representa a ordem do processo AR;

$d$  – representa a ordem do processo de diferenciação;

$q$  – representa a ordem do processo MA;

$P$  – representa a ordem do processo AR sazonal;

$D$  – representa a ordem do processo de diferenciação sazonal;

$Q$  – representa a ordem do processo MA sazonal.

Os modelos ARIMA com contemplação de sazonalidade podem ser definidos matematicamente da seguinte forma:

$$\phi(L)\phi(L^s)(1-L)^d(1-L)^D Y_t = \theta(L)\Theta(L^s)e_t \quad (3.5)$$

Onde:

$\phi(L)$  – polinómio auto-regressivo não sazonal de ordem  $p$ ;

$\theta(L)$  – polinómio de médias móveis não sazonal de ordem  $q$ ;

$\phi(L^s)$  – polinómio auto-regressivo sazonal de ordem  $P$ ;

$\Theta(L^s)$  – polinómio de médias móveis sazonal de ordem  $Q$ ;

$Y_t$  – trata-se da sucessão cronológica univariada em estudo;

$e_t$  – erro gerado por um processo de ruído branco;

L – operador *lag*;

$L^s$  – operador *lag* respeitante à componente sazonal.

- **Modelos de Alisamento Exponencial**

A técnica de alisamento exponencial é uma técnica muito útil para previsão a curto prazo de uma sucessão cronológica. No entanto, esta técnica não fornece qualquer informação acerca da confiança das previsões (Magalhães, 1993). Tal facto deve-se em parte à não utilização de nenhuma regressão para estimar o modelo, não sendo possível desta forma fazer inferência (Magalhães, 1993).

Os métodos de alisamento exponencial operam do mesmo modo que os métodos de médias móveis, ou seja, tentam suavizar a sucessão de forma a eliminar aleatoriedades. No entanto, os métodos de alisamento exponencial permitem dar um peso mais relevante às observações mais recentes da sucessão cronológica, sendo obtida uma melhor perspectiva do nível actual da sucessão. Assim, as observações consideradas para previsão não são dotadas do mesmo peso, permitindo dar mais importância às observações mais recentes em detrimento das observações mais antigas, eliminando a necessidade de armazenamento da totalidade dos valores da sucessão cronológica (Magalhães, 1993).

Na presente dissertação foram utilizados os seguintes métodos de alisamento exponencial:

- **Alisamento exponencial simples** – A utilização deste tipo de modelo é apropriada para sucessões cronológicas em que não existe tendência ou sazonalidade. Este tipo de modelos apenas contém um parâmetro de alisamento, denominado por alisamento de nível.
- **Método de Holt** – O seu uso é adequado para sucessões cronológicas em que há uma tendência linear e não existe sazonalidade. Os seus parâmetros de alisamento são de nível da sucessão e de tendência.

- **Método de Brown ou Alisamento exponencial duplo** – Este modelo é à semelhança do método de Holt, apropriado para sucessões cronológicas em que há uma tendência linear e não existe sazonalidade. O método de Brown corresponde a uma particularidade do método de Holt contendo igualmente duas constantes, sendo no entanto neste caso iguais entre si.
- **Alisamento de tendência amortecida** – A utilização deste modelo é apropriada para sucessões cronológicas em que existe uma tendência linear pouco acentuada e não existe qualquer sazonalidade. Os seus parâmetros de alisamento são de nível da sucessão, de tendência e declive da tendência. Esta alternativa permite tornar a metodologia de alisamento mais robusta e flexível. Este tipo de modelos realiza a extrapolação do nível da sucessão, de modo a que o efeito da tendência se vá atenuando à medida que horizonte da previsão cresce. Para tal, ao método de Holt é acrescentado um parâmetro adicional que actua como constante de ajustamento à estimativa do declive da tendência.
- **Alisamento exponencial sazonal simples** – Este modelo é apropriado para sucessões cronológicas sem tendência e dotadas de efeito sazonal constante ao longo do tempo. Os seus parâmetros de alisamento são de nível da sucessão e de sazonalidade.
- **Método de Holt-Winters aditivo e Holt-Winters multiplicativo** - Estes modelos correspondem a uma extensão do método de Holt, sendo apropriados para sucessões cronológicas com uma tendência linear e um efeito sazonal que não dependem do nível da mesma. Os seus parâmetros de alisamento são de tendência, nível da sucessão, e sazonalidade.

### **3.1.3 – Validação dos Pressupostos do Modelo**

Os modelos ARIMA realizados a partir da análise de sucessões cronológicas são assentes em determinados pressupostos que têm que ser cumpridos. Os pressupostos em que os modelos ARIMA se encontram assentes são os seguintes:

- Os resíduos  $e_t$  constituem um processo aleatório puro, tratando-se assim de um ruído branco;

- Os resíduos  $e_t$  são variáveis aleatórias identicamente distribuídas com distribuição Normal, com valor médio nulo e variância constante;
- Os resíduos são variáveis aleatórias independentes tal que  $\gamma_g = 0$  ( $g > 0$ );  $\rho_g = 0$  ( $g > 0$ ).

Em que:

$\gamma_g$  – é a covariância;

$\rho_g$  – é o coeficiente de correlação de Pearson;

$g$  – é o período de previsão, tal que para  $\rho(e_t, e_{t+1})$  tem-se que  $g = 1$ .

Com o fim de se assegurar a normalidade dos resíduos procede-se a testes de ajustamento destes à distribuição Normal. Já para assegurar a igualdade de variâncias deverá ser realizada a análise gráfica dos mesmos.

Para verificar que os resíduos são independentes a função de autocorrelação dos mesmos deve ser aproximadamente nula (Magalhães, 1993). Desta forma para garantir que os valores dos resíduos ( $e_t$ ) são aproximadamente nulos os mesmos devem estar compreendidos entre:

$$-\frac{2}{\sqrt{T}} < e_t < \frac{2}{\sqrt{T}} \quad (3.6)$$

Onde  $T$  representa o número de observações da sucessão cronológica. Em simultâneo, dever-se-á também ter em consideração a estatística de Ljung-Box, cujo a qual deverá assegurar que os resíduos não se encontram autocorrelacionados, atendendo aos coeficientes de correlação de Pearson ( $\rho_g$ ). Assim, a fim de assegurar que os resíduos não se encontram autocorrelacionados a seguinte hipótese nula não deverá ser rejeitada:

$$H_0: \rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \dots = \rho_g = 0 \quad (3.7)$$

### **3.1.4 – Avaliação da Qualidade de Ajustamento**

Após a obtenção do modelo é necessário avaliar o modelo quanto à sua precisão. Desta forma, a utilização de certos indicadores para avaliar a qualidade de ajustamento do modelo deve ser tida em consideração.

Na presente dissertação foram considerados como indicadores o *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), o *Mean Square Error* (MSE), o *Root Mean Square Error* (RMSE), o *Normalized Bayesian Information Criterion* (BIC) e o *R-Squared* ( $R^2$ ), no entanto foi apenas dada mais relevância aos dois últimos.

Os indicadores MAPE, MSE e RMSE podem respectivamente ser escritos matematicamente pelas expressões seguintes:

$$\text{MAPE} = \frac{100}{T} \sum |(Y(t) - \hat{Y}(t))/Y(t)| \quad (3.8)$$

$$\text{MSE} = \frac{\sum(Y(t) - \hat{Y}(t))^2}{T-k} \quad (3.9)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} \quad (3.10)$$

Em que:

$Y(t)$  – trata-se da sucessão cronológica univariada em estudo;

$\hat{Y}(t)$  – é o valor estimado pela análise de sucessões cronológicas;

$T$  – é o número total de observações.

Relativamente ao indicador BIC o mesmo foi tido em consideração, pois tem em ponderação o número de parâmetros do modelo. O valor de BIC aumenta com a variabilidade não explicada dos resíduos do modelo e com o número de parâmetros do mesmo (Yaffee e McGee, 2000). Realizando a comparação entre modelos deve-se escolher o modelo que contenha BIC mais baixo. Este indicador pode ser representado matematicamente atendendo à seguinte expressão:

$$\text{BIC} = \ln(\text{MSE}) + k \frac{\ln(T)}{T} \quad (3.11)$$

Onde:

$T$  – é o número total de observações;

$k$  – revela o número de parâmetros do modelo.

O indicador  $R^2$ , foi considerado para a otimização da modelação, pois o modelo a obter deverá ser dotado de um  $R^2$  o mais próximo de 1 possível, pelo que se for unitário o ajuste do modelo à serie de dados da sucessão cronológica é perfeito (Yaffee e McGee, 2000).

Matematicamente o indicador  $R^2$  pode ser descrito da seguinte forma:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y(t) - \hat{Y}(t))^2}{\sum(Y(t) - \bar{Y})^2} \quad (3.12)$$

Em que:

$Y(t)$  – trata-se da sucessão cronológica univariada em estudo;

$\bar{Y}$  – é o valor médio das observações da sucessão cronológica;

$\hat{Y}(t)$  – é o valor estimado pela análise de sucessões cronológicas.

Nos modelos ARIMA, na avaliação da qualidade de ajustamento do modelo é necessário ter em consideração os seus coeficientes. Para tal, deve-se testar individualmente cada um dos coeficientes ( $\beta_j$ ) do modelo, utilizando-se um teste t. Assim é necessário realizar o seguinte teste de hipóteses:

$$H_0: \beta_j = 0 \quad (3.13)$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \quad (3.14)$$

A rejeição da hipótese nula deverá ser assegurada a fim de se garantir que os coeficientes  $\beta_j$  do modelo são significativos.

Por último deverá ser tida em consideração a qualidade da previsão obtida pelo modelo seleccionado, pelo que se não for a mais adequada, deverão ser utilizados algoritmos diferentes.

### 3.1.5 – Software Utilizado

Para a realização da presente dissertação foram utilizados para a execução da modelação, previsão e respectivas conclusões o *software Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)*, versão *IBM SPSS Statistics 19*, bem como o *software Microsoft Office 2007*.

A modelação e respectiva previsão efectuadas nos diferentes estudos abordados ao longo da presente dissertação foram realizadas usando a ferramenta *EXPERT MODELER* disponível no *software SPSS*. A aplicação indicada permite realizar a estimação do modelo maximizando o valor de  $R^2$  associado. A mesma possibilita ainda a estimação dos parâmetros do modelo tendo em conta os

diferentes tipos de *outliers* presentes na sucessão cronológica, permitindo desta forma contabilizar o efeito que estes têm na sucessão cronológica.

Segundo Peña et al. (2001) os *outliers* podem ser de vários tipos, sendo genericamente divididos em *outliers* aditivos, *innovative outliers* e ainda *level shifts*.

Os *outliers* aditivos caracterizam erros externos ou mudanças exógenas de determinados valores observados. Este tipo de *outliers* influencia acentuadamente os resíduos e a estimação dos parâmetros do modelo (Peña et al., 2001).

Já os *innovative outliers* caracterizam-se por serem gerados por um efeito endógeno no processo de ruído. A sua presença influencia em pequena escala a autocorrelação dos resíduos e a estimação dos parâmetros do modelo (Peña et al., 2001).

Por fim, os *outliers* do tipo *level shifts* correspondem a uma mudança do nível do processo num ponto específico continuando até ao fim do período temporal observado (Peña et al., 2001).

Para considerar o efeito dos *outliers* presentes na sucessão cronológica a ferramenta utilizada realiza assim as seguintes etapas:

- I. Detectar o instante em que ocorre o *outlier*;
- II. Identificar o tipo de *outlier*;
- III. Realizar novamente as etapas anteriores para os diferentes *outliers*;
- IV. Remover o efeito dos *outliers*, estimando o modelo e incorporando-os de seguida.



---

## Capítulo 4

---

# Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores

*No presente capítulo é realizada a apresentação e análise descritiva dos dados utilizados. São apresentados os diversos estudos realizados, propondo-se um processo de modelação. Apresentam-se ainda os resultados obtidos e conclui-se sobre os mesmos.*



## **4 – Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores**

O objectivo central do presente estudo consistiu na concepção de um processo de modelação com base na análise de sucessões cronológicas para a previsão do valor horário de um parâmetro que estima o grau de competitividade das estratégias dos agentes produtores no mercado diário do MIBEL, permitindo assim a previsão horária do nível de competitividade futuro no mercado. Para tal, após o estudo de várias abordagens, foi considerada a previsão somente para dias úteis, mais precisamente para um horizonte temporal de 5 dias úteis.

A variável em estudo utilizada para prever a competitividade dos agentes produtores no MIBEL, tratou-se da variação conjectural, obtida a partir da solução do modelo de variações conjecturais, apoiando-se no estudo de Lagarto et al. (2010).

### **4.1 – Análise e Tratamento dos Dados Utilizados**

Os dados de variação conjectural usados referem-se a uma base horária, sendo os mesmos calculados com o auxílio do simulador SiMEC v3.0 desenvolvido em Lagarto et al. (2010).

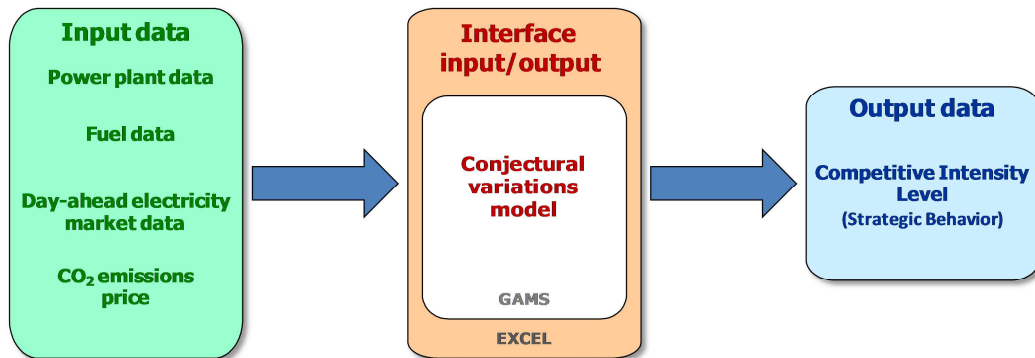
O simulador indicado possui dois modos de funcionamento, nomeadamente o modo de estimação e o modo de previsão. Para a obtenção do valor de variação conjectural horário, foi utilizado o simulador funcionando em modo de estimação.

No modo de estimação, o simulador resolve o modelo de variações conjecturais determinando o parâmetro horário referente à variação conjectural de acordo com o preço associado a emissões de CO<sub>2</sub>, preços dos combustíveis utilizados na produção de energia eléctrica, características das centrais produtoras de energia eléctrica e dados de preço de energia eléctrica referentes ao mercado diário do MIBEL.

No modo de previsão, o simulador utilizando o parâmetro horário referente à variação conjectural de acordo com o preço associado a emissões de CO<sub>2</sub>, preços

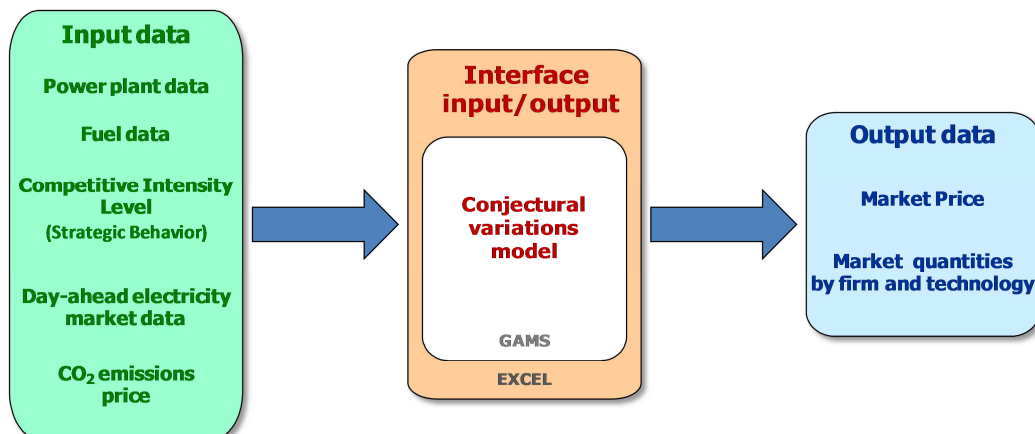
dos combustíveis utilizados na produção de energia eléctrica e características das centrais produtoras de energia eléctrica, calcula o preço de fecho de mercado e a quantidade de energia transaccionada.

Os modos de funcionamento do simulador podem ser observados esquematicamente nas Figuras 4.1 e 4.2 respectivamente:



Fonte: Lagarto et al. (2012)

**Figura 4.1-** Representação esquemática do funcionamento do simulador SiMEC v3.0 em modo de estimação.



Fonte: Lagarto et al. (2012)

**Figura 4.2-** Representação esquemática do funcionamento do simulador SiMEC v3.0 em modo de previsão.

A precisão do processo de modelação, constitui um factor a ter em consideração, pois a optimização do modelo e previsões obtidas são de grande importância, uma vez que a previsão do nível competitivo do mercado deverá ser tão mais precisa quanto possível.

De forma a melhorar o processo para estimação do modelo e posterior previsão, foram analisados dois períodos de dados distintos de variação conjectural para esse fim. Tal factor padece de extrema importância pois a

estimação do modelo por análise de sucessões cronológicas será tão melhor quanto mais estável for a sucessão cronológica utilizada para o estimar.

Ao longo do estudo efectuado foram utilizados dois períodos de dados de variação conjectural distintos:

- **1º Período de dados:** 1 de Julho de 2007 a 30 de Junho de 2008;
- **2º Período de dados:** dias úteis de 1 de Novembro de 2010 e 30 de Outubro de 2011.

A análise descritiva dos períodos de dados abordados encontram-se em detalhe de seguida.

#### **4.1.1 – Análise Descritiva – 1º Período de Dados**

Numa primeira abordagem, a fim de se observar o impacto na competitividade do sector eléctrico com a integração nacional de mercado português e do mercado espanhol com o surgimento do MIBEL, foram utilizados dados horários de variação conjectural entre 1 de Julho de 2007 e 30 de Junho de 2008, que corresponde ao primeiro ano de funcionamento do MIBEL.

O conjunto de dados para este período, foi obtido pela média ponderada da variação conjectural horária referente ao mercado português e a variação conjectural horária referente ao mercado espanhol tendo como referência a energia vendida em cada mercado em base horária de acordo com as licitações de venda casadas. Os dados de variação conjectural para este período respeitantes ao MIBEL foram assim obtidos recorrendo à expressão 4.1:

$$\theta_{\text{MIBEL}} = \frac{\theta_{\text{ES}} \times E_{\text{ES}} + \theta_{\text{PT}} \times E_{\text{PT}}}{E_{\text{ES}} + E_{\text{PT}}} \quad (4.1)$$

Em que:

$\theta_{\text{MIBEL}}$  – variação conjectural referente ao MIBEL;

$\theta_{\text{ES}}$  – variação conjectural referente ao mercado espanhol;

$\theta_{\text{PT}}$  – variação conjectural referente ao mercado português;

## *Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores*

$E_{ES}$  – energia vendida no mercado espanhol em MWh;

$E_{PT}$  – energia vendida no mercado português em MWh.

Com o objectivo de observar o comportamento do conjunto de dados para este período foi realizada a análise dos cronogramas mensais. Desta forma, foi possível constatar a existência de grande volatilidade para os dados de variação conjectural estudados. Tal, deve-se ao facto da variação conjectural ser calculada através do preço horário dos combustíveis utilizados na produção de energia eléctrica, preço associado a emissões de  $CO_2$  e preço de fecho de mercado (também em base horária), pelo que sendo o preço de fecho de mercado uma grandeza propicia a grande volatilidade, a variação conjectural assume um comportamento também ele volátil.

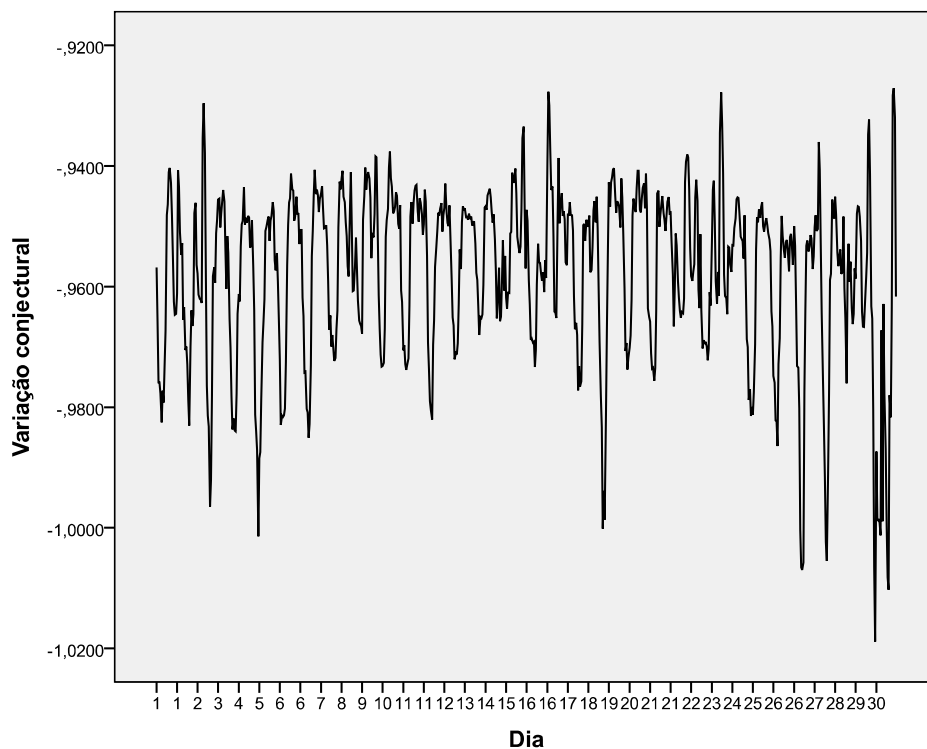
Para o presente período de dados não se constatou a existência comportamentos colusivos (variação conjectural superior a 0) e de concorrência à Cournot (variação conjectural igual a 0). No entanto, a existência de concorrência perfeita (variação conjectural igual a -1) foi registada somente em algumas horas.

Analisando a sucessão cronológica para o período indicado verificou-se a inexistência de componente cíclica, pelo que não se observou movimentos oscilatórios a médio prazo. A existência de uma tendência global na sucessão cronológica para este período também não foi observada, não apresentando assim qualquer evolução global de crescimento ou decrescimento.

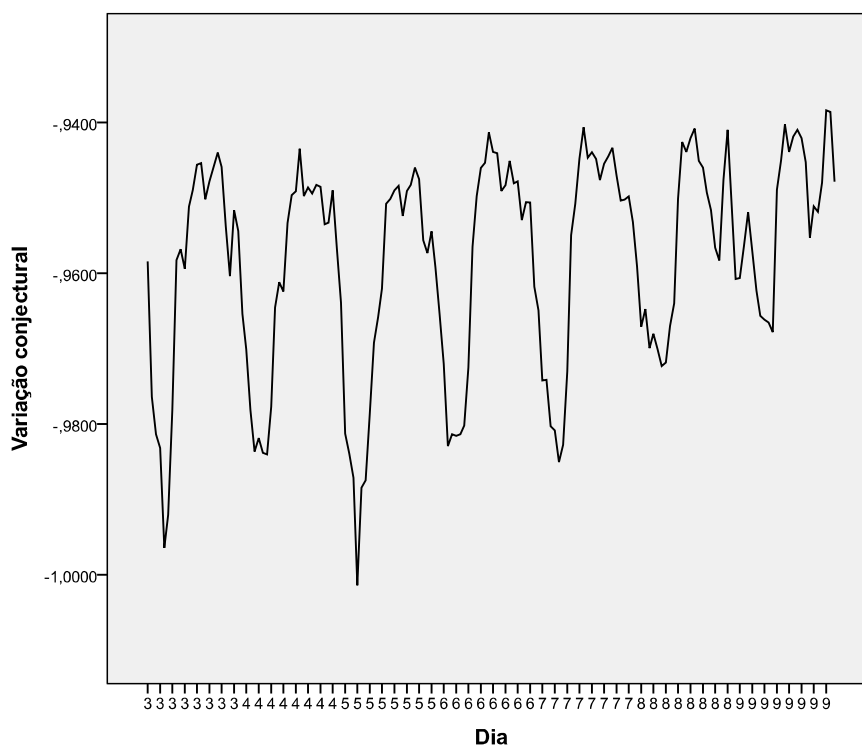
Para este período a sucessão cronológica não revelou a presença de sazonalidade mensal ou mesmo semanal. No entanto, a existência de sazonalidade diária aditiva foi averiguada.

Assim, foi possível constatar a presença de flutuações na variação conjectural assumindo uma componente aditiva com periodicidade diária.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, encontram-se respectivamente o cronograma da variação conjectural no MIBEL para o mês de Setembro do ano de 2007 e o cronograma semanal para uma semana do mesmo mês, podendo ser observada a existência de sazonalidade diária aditiva.



**Figura 4.3-** Cronograma da variação conjectural no MIBEL para o mês de Setembro de 2007.



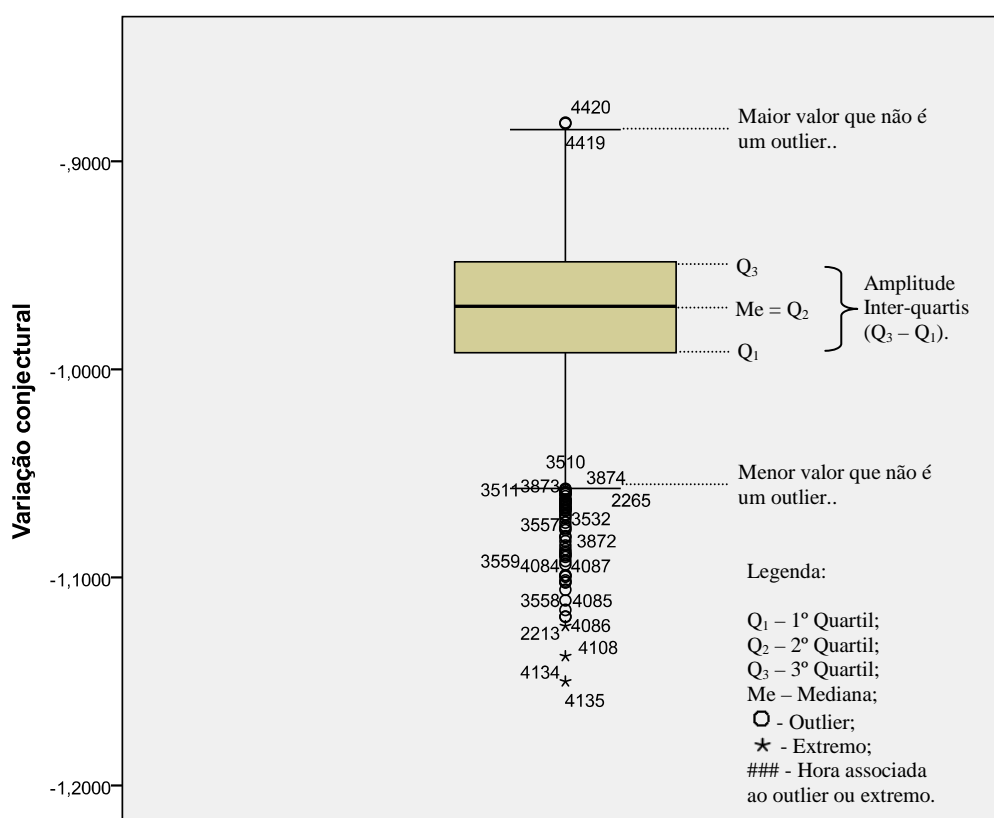
**Figura 4.4-** Cronograma da variação conjectural no MIBEL na semana de 3 a 9 de Setembro de 2007.

Analisadas as componentes constituintes da sucessão cronológica, procedeu-se à análise da estatística descritiva associada à mesma.

Pela realização do seu diagrama de caixas, com a definição dos quartis correspondentes, foi possível apurar a existência substancial de extremos e *outliers*.

Os *outliers* e extremos registados foram presenciados nos primeiros 7 meses após a entrada em funcionamento do MIBEL (de Julho de 2007 a Janeiro de 2008), revelando assim uma maior instabilidade no comportamento descrito pelos agentes produtores no MIBEL nesse período.

Na Figura 4.5 encontra-se o diagrama de caixas referente aos dados de variação conjectural em análise, podendo ser observado tal como mencionado anteriormente uma quantidade elevada de extremos e *outliers*.



**Figura 4.5-** Diagrama de caixas para os dados de variação conjectural no MIBEL entre Julho de 2007 e Junho de 2008.

Na representação anterior, 25% das observações têm um valor inferior ou igual a  $Q_1$ , 50% têm um valor inferior ou igual a  $Q_2$  e 75% da amostra têm um valor inferior ou igual a  $Q_3$ . Os *outliers* tratam-se de valores superiores a  $[Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1)]$  ou inferiores a  $[Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1)]$ , já os extremos tratam-se de valores superiores a  $[Q_3 + 3(Q_3 - Q_1)]$  ou inferiores a  $[Q_1 - 3(Q_3 - Q_1)]$ .

Apesar da existência de *outliers* e extremos, analisando o valor de mediana obtido, uma vez que se trata de uma medida robusta aquando a presença dos mesmos, foi constatado que os mesmos não influenciam de forma acentuada o conjunto de dados na sua globalidade, pois os valores registados encontram-se dentro do previsto. As medidas de dispersão e de localização associadas ao período de dados em estudo encontram-se em detalhe na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1-** Estatística descritiva dos dados de variação conjectural no MIBEL entre Julho de 2007 e Junho de 2008.

Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão Corrigido
-0,9714	-0,9697	-0,9271	-1,15	-0,8815	0,0316

No período inicial após a abertura do MIBEL a existência de *market splitting* era muito frequente, tendo diminuído substancialmente desde então. Desta forma, para aprimorar os resultados, modelação e previsão da variação conjectural para espaços temporais mais recentes procedeu-se à análise de dados também eles mais recentes.

Por outro lado, optou-se pela análise apenas para dias úteis, assumindo-se desta forma a prioridade de analisar a previsão da variação conjectural do MIBEL para dias úteis em detrimento dos dias não úteis. O motivo inerente a esta opção consistiu essencialmente em aperfeiçoar a modelação e respectiva previsão, desprezando assim o comportamento competitivo no mercado registado nos fins-de-semana e feriados.

#### **4.1.2 – Análise Descritiva – 2º Período de Dados**

Os dados referentes à sucessão cronológica da variação conjectural do MIBEL para os dias úteis compreendidos entre 1 de Novembro de 2010 a 30 de Outubro de 2011, foram obtidos pela utilização da média ponderada do preço de fecho de cada mercado de acordo com a energia vendida no mercado correspondente, obedecendo à expressão 4.2:

$$P_{\text{MIBEL}} = \frac{P_{\text{ES}} \times E_{\text{ES}} + P_{\text{PT}} \times E_{\text{PT}}}{E_{\text{ES}} + E_{\text{PT}}} \quad (4.2)$$

Em que:

$P_{\text{MIBEL}}$  – preço de fecho de mercado no MIBEL em €/MWh;

$P_{\text{ES}}$  – preço de fecho do mercado espanhol em €/MWh;

$P_{\text{PT}}$  – preço de fecho do mercado português em €/MWh;

$E_{\text{ES}}$  – energia vendida no mercado espanhol em MWh;

$E_{\text{PT}}$  – energia vendida no mercado português em MWh.

Assim, utilizando o simulador SiMEC v3.0 foram obtidos os dados de variação conjectural referentes ao MIBEL para o período em estudo. A abordagem utilizada teve como objectivo a obtenção de dados mais precisos relativamente à abordagem utilizada no ponto anterior. O processo realizado para a obtenção dos dados de variação conjectural associados ao MIBEL para este período foi realizada antes da utilização do simulador, contendo menor impacto nos dados utilizados do que a abordagem anterior contribuindo assim para resultados mais precisos.

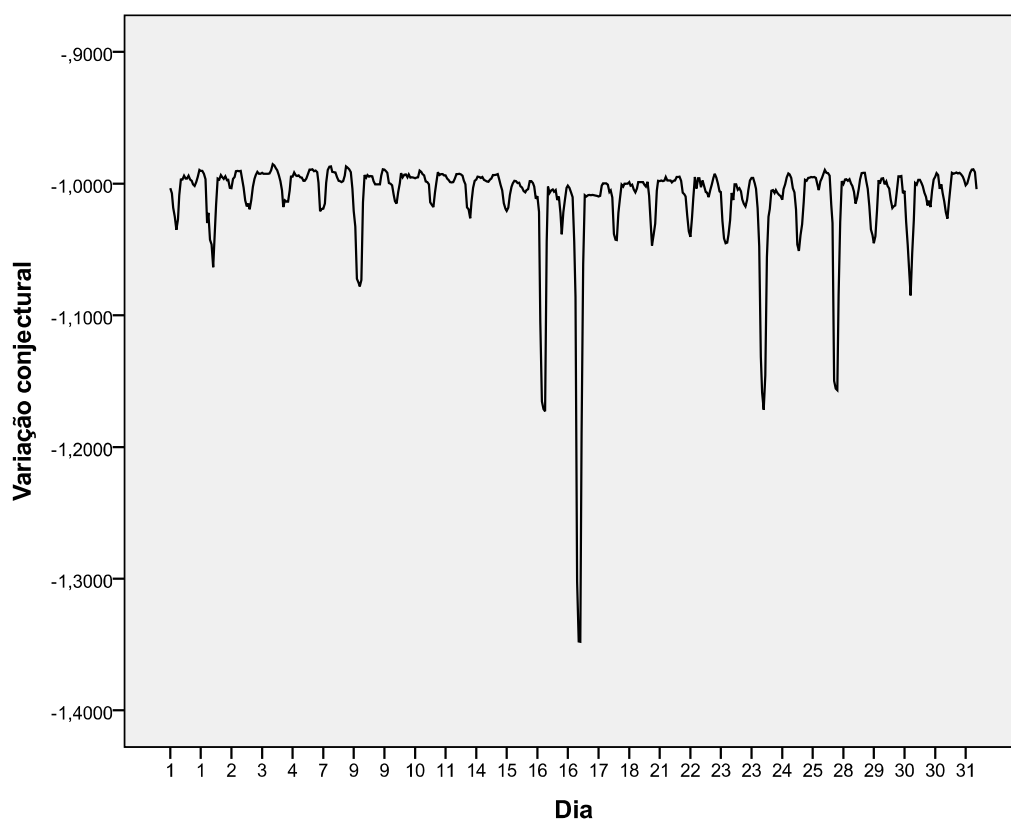
Em similaridade com o período de dados anterior, foi possível constatar a existência de grande volatilidade para os dados de variação conjectural estudados pela análise dos cronogramas mensais e semanais. A ocorrência de comportamentos colusivos (variação conjectural superior a 0) e de concorrência à Cournot (variação conjectural igual a 0) não se verificou seguindo o período de dados anterior, bem como a existência de concorrência perfeita (variação conjectural igual a -1) apenas em algumas horas.

Em semelhança com os dados anteriores relativamente às componentes da sucessão cronológica em estudo apenas foi averiguada a presença de sazonalidade diária aditiva.

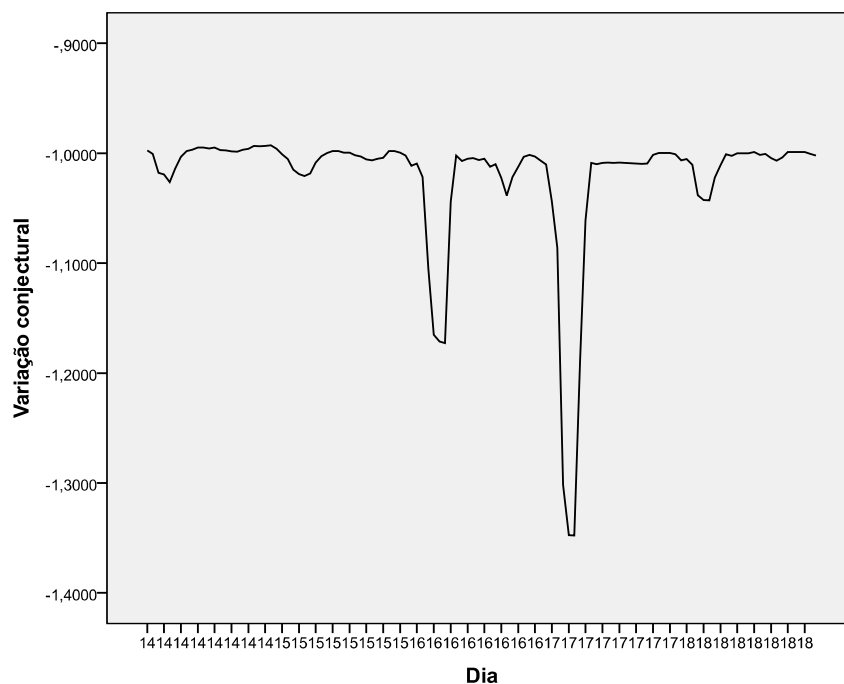
Pela análise dos cronogramas mensais e semanais verificou-se que os mesmos apresentam um padrão distinto relativamente ao 1º período de dados, onde apesar da volatilidade existente presencia-se claramente o aumento de competitividade nas horas de vazio.

O aumento da competitividade registado nas horas de vazio, deve-se em parte ao valor do preço de fecho de mercado nessas mesmas horas apresentar valores muito reduzidos aumentando a competitividade dos agentes produtores no MIBEL.

Nas Figuras 4.6 e 4.7, encontram-se respectivamente o cronograma da variação conjectural no MIBEL para o mês de Março do ano de 2011 e o cronograma semanal para uma semana do mesmo mês, podendo ser observado o padrão descrito.

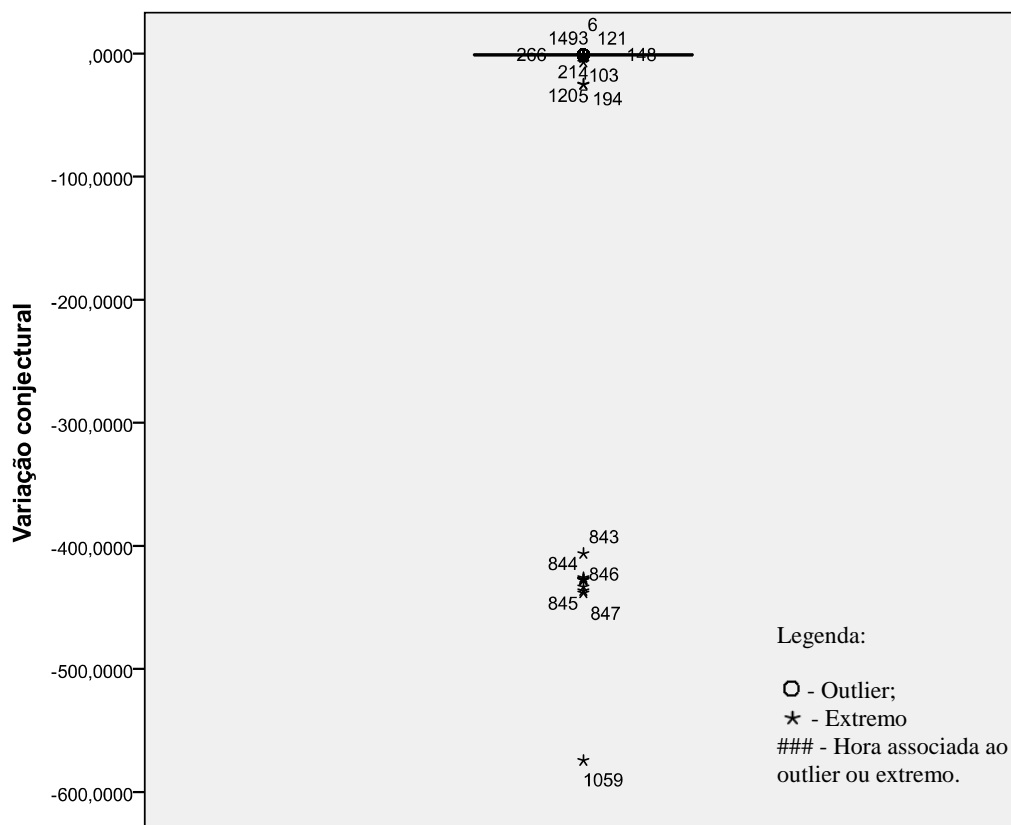


**Figura 4.6-** Evolução da variação conjectural no MIBEL em Março de 2011 (dias úteis).



**Figura 4.7-** Cronograma da variação conjectural no MIBEL na semana de 14 a 18 de Março de 2011 (dias úteis).

Efectuada a ilustração gráfica da sucessão cronológica em estudo, pela análise sob a forma de diagrama de caixas observou-se que os dados de variação conjectural registados em Dezembro e Janeiro contribuíam negativamente para a mesma, influenciando esta acentuadamente registando-se extremos de grande amplitude (da ordem dos -500 a -400). A existência de tal discrepância neste conjunto de dados, deve-se ao facto do valor de preço de fecho de mercado ter assumido valores próximos de zero em determinadas horas desses meses aumentando acentuadamente a competitividade no mercado. Na Figura 4.8 encontra-se o diagrama de caixas do presente período de dados sendo observáveis os extremos indicados.



**Figura 4.8-** Diagrama de caixas para os dados de variação conjectural no MIBEL entre os dias úteis de Novembro de 2010 e Outubro de 2011.

Em comparação com o valor de mediana obtido no 1º período de dados (Tabela 4.1) foi averiguada a diminuição do valor de mediana da variação conjectural (aumento da competitividade). As medidas de dispersão e localização central para o presente caso encontram-se em detalhe na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2-** Estatística descritiva dos dados de variação conjectural no MIBEL entre os dias úteis de Novembro de 2010 e Outubro de 2011.

Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão Corrigido
-1,7869	-0,9908	-1,0000	-574,4012	-0,9370	18,5583

De notar, que apesar do valor de moda obtido corresponder ao valor de variação conjectural do MIBEL para o qual o mercado se encontra em concorrência perfeita, verificou-se a ocorrência de vários valores de moda.

Assim, devido à análise efectuada, aquando a posterior modelação e respectiva previsão com o apoio destes mesmos dados não foram utilizados dados anteriores a 25 de Janeiro, visando evitar a influência registada pelos extremos referidos.

## **4.2 – Estudos Preliminares – 1º Período de Dados**

Para a escolha do modelo mais adequado foram estudados diversos processos distintos, apoiando-se em várias abordagens possíveis com o fim de refinar o modelo escolhido e previsão que daí advirá.

Os estudos prévios realizados, no que diz respeito à escolha do processo para a estimação do modelo mais adequado, foram compostos essencialmente por três etapas de modelação, utilizando os seguintes conjuntos de dados (C1, C2 e C3):

- **C1:** Dados de variação conjectural do MIBEL entre 1 de Julho de 2007 a 30 de Junho de 2008;
- **C2:** Dados de variação conjectural do MIBEL entre 26 de Fevereiro de 2008 a 30 de Junho de 2008;
- **C3:** Dados de variação conjectural do MIBEL de dias úteis entre 26 de Fevereiro de 2008 a 30 de Junho de 2008.

### **4.2.1 – Modelação - Conjunto de Dados C1**

Numa primeira abordagem foi realizada a modelação utilizando para isso um ano de observações de variação conjectural (valores horários de 1 de Julho de 2007 a 30 de Junho de 2008 – 1º período de dados). Para este caso foi apenas considerada a estimação do modelo utilizando a detecção de *outliers*. O modelo obtido neste caso tratou-se de um ARIMA(3,0,2)(2,0,1), tendo sido obtido um R<sup>2</sup> no valor de 0,829, pelo que desta forma 82,9% da variabilidade fora explicada.

Nesta situação, foi verificado que a modelação realizada utilizando os dados referentes ao ano indicado não era satisfatória, uma vez que a validação dos pressupostos do modelo não fora assegurada, encontrando-se os resíduos autocorrelacionados, não devendo ser realizada qualquer inferência utilizando o modelo obtido.

Desta forma, tratando-se de uma abordagem não satisfatória, partiu-se posteriormente para outro estudo.

#### **4.2.2 – Modelação - Conjunto de Dados C2**

A fim de melhorar a abordagem indicada anteriormente procedeu-se à análise para uma sucessão cronológica com dados entre 26 de Fevereiro de 2008 a 30 de Junho de 2008 com o objectivo de melhorar o modelo a obter, principalmente no que diz respeito à validação dos pressupostos do modelo. Para este caso, em consistência com a abordagem anterior apenas foi considerada a estimação do modelo utilizando a detecção de *outliers*.

Para o presente conjunto de dados o modelo obtido foi um ARIMA(1,0,1)(1,1,1). Ao contrário da abordagem anterior no presente caso os pressupostos do modelo foram validados na totalidade, no entanto o  $R^2$  obtido foi pior assumindo um valor de 0,704.

Por esta razão considerou-se a modelação apenas para dias úteis tendo como objectivo apurar a previsão para dias úteis em detrimento dos fins-de-semana e feriados (de origem portuguesa e espanhola).

#### **4.2.3 – Modelação - Conjunto de Dados C3**

Em resposta aos estudos enunciados anteriormente procedeu-se à modelação apenas para dias úteis. A modelação para dias úteis foi tida em conta tal como referido a fim de obter a estimação de modelos mais precisos, no entanto, a previsão para dias não úteis (fins-de-semana e feriados) não foi contemplada. Utilizando este tipo de modelos apenas a previsão de dias úteis pode ser realizada.

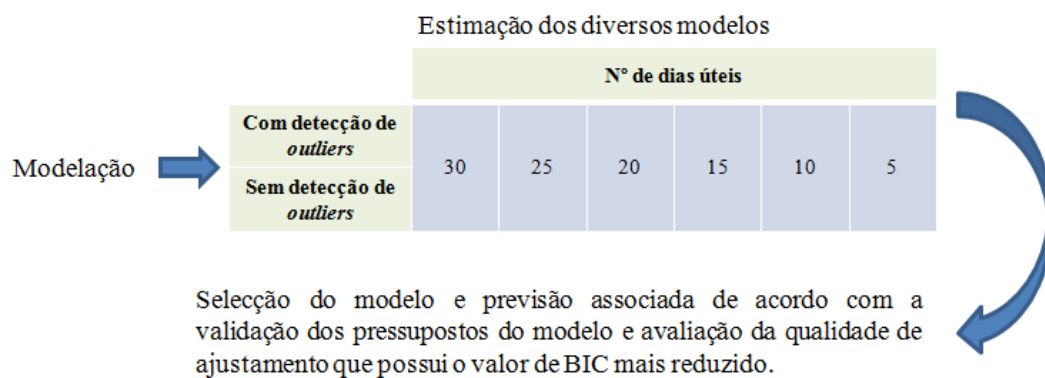
No presente estudo optou-se por realizar diversos modelos realizando a sua estimação atendendo à utilização de dados de variação conjectural correspondentes a 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias úteis, com a finalidade de prever 5 dias úteis. Esta opção teve como objectivo verificar qual o número de observações da sucessão cronológica que corresponderia à obtenção do melhor modelo possível e se o mesmo seria único. No presente estudo foi realizada a estimação dos parâmetros dos modelos com e sem a detecção de *outliers*.

Concebendo que o objectivo é a previsão, aquando a modelação na prática os valores reais correspondentes ao período a prever não estariam disponíveis, pelo que, a escolha do modelo dever-se-á cingir à avaliação da qualidade de ajustamento e validação dos pressupostos do modelo.

No entanto, o modelo seleccionado não corresponde necessariamente ao modelo que conduz aos erros de previsão mais reduzidos.

Assim, foi concebido que o modelo seleccionado como o melhor para um determinado caso de estudo, corresponde ao modelo que em simultâneo valida os pressupostos do modelo e possui o valor de BIC mais reduzido.

Em resumo, no presente estudo a selecção do modelo seguiu as etapas representadas na Figura 4.9:



**Figura 4.9-** Representação da sequência tomada para modelação.

Neste estudo foram abordados dois casos de estudo distintos. Para o primeiro caso, foi realizado o estudo visando a previsão do período entre 23 de Junho a 30 de Junho de 2008. Já para o segundo caso, foi estudada a previsão para o período de 26 de Maio a 30 de Maio de 2008.

Após a realização deste estudo foi possível observar que para sucessões cronológicas de dimensões distintas os modelos obtidos também seriam distintos.

A estimação dos modelos utilizando a detecção de *outliers* também se revelaram distintos, em comparação com os modelos estimados sem a detecção de *outliers* para a mesma dimensão da sucessão cronológica.

Para a primeira análise foi obtido como melhor modelo um ARIMA(0,1,0)(0,1,1) com um  $R^2$  no valor de 0,972 para a utilização de uma

sucessão cronológica com uma dimensão de 10 dias úteis para a estimação com detecção de *outliers*. Já no segundo estudo, foi obtido um ARIMA(1,0,0)(0,1,1) com um  $R^2$  de 0,947, igualmente para a utilização de uma sucessão cronológica com uma dimensão de 10 dias úteis para a estimação com detecção de *outliers*. Desta forma, foi possível verificar que a mesma dimensão de sucessão cronológica e tipo de estimação conduziu em ambos os casos à obtenção do melhor modelo, pelo que eventualmente poderia não conduzir.

A abordagem realizada proporcionou assim melhorias nos valores de  $R^2$  obtidos relativamente aos estudos realizados anteriormente. Assim, na presente dissertação foi seleccionada a previsão dos agentes produtores no MIBEL apenas para dias úteis, com base na abordagem efectuada neste mesmo estudo.

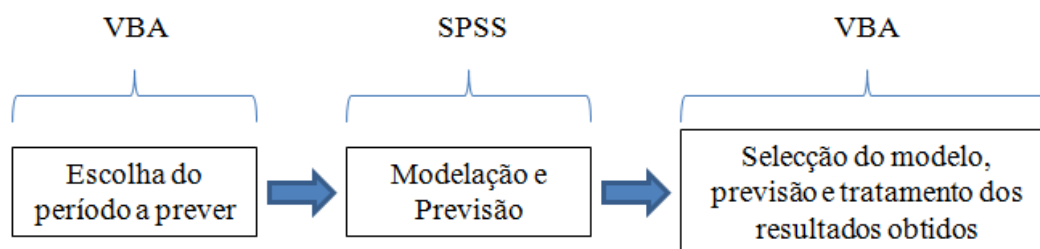
Após os diferentes estudos abordados anteriormente optou-se pela utilização de dados mais recentes para a realização de posteriores simulações. Tal opção, deve-se em primeira instância à instabilidade verificada na variação conjectural para o período de Julho de 2007 a Julho de 2008, constatando-se grande oscilação (não padronizada) no comportamento dos agentes do lado da oferta no MIBEL. Tal comportamento, pode estar relacionado com a existência de *market splitting* frequente no início da entrada em funcionamento do MIBEL. Assim, a fim de aperfeiçoar a previsão e a análise do comportamento da variação conjectural registado para dados mais recentes foram utilizados dados entre 1 de Novembro de 2010 e 30 de Outubro de 2011 (2º período de dados).

Em virtude de se verificar que para diferentes janelas temporais os modelos obtidos não são os mesmos, foi realizado um procedimento de modelação possibilitando a selecção automática do melhor modelo e a execução da respectiva previsão para diferentes janelas temporais, sendo o mesmo descrito em detalhe de seguida.

### 4.3 – Processo de Modelação

Para a realização da modelação e respectiva previsão de variação conjectural para diferentes janelas temporais foi desenvolvido um processo de modelação com recurso a programação em *Visual Basic for Applications* (VBA) no *software Microsoft Office 2007* através da realização de macros e programação no *software SPSS* sendo implementados comandos com recurso à ferramenta *SPSS Syntax Editor*.

A interacção entre a programação realizada em VBA e a programação realizada no *software SPSS* pode ser observada na Figura 4.10.



**Figura 4.10-** Representação da interacção entre a programação realizada no *software SPSS* e a programação realizada em VBA.

A programação realizada em VBA teve como finalidade possibilitar a escolha do caso de estudo a abordar pela selecção do utilizador, bem como o tratamento dos dados provenientes da modelação, tais como indicadores, designação dos diferentes modelos e escolha do melhor modelo com base na validação dos seus pressupostos e avaliação da qualidade de ajustamento. Deste modo, com recurso a programação em VBA a escolha do modelo será realizada automaticamente com recurso a macros, sendo em primeiro lugar importados os dados obtidos na modelação realizada em SPSS, de seguida será verificada a validação dos modelos cumprindo os requisitos necessários, realizando-se finalmente a escolha do melhor modelo que simultaneamente valide as condições necessárias e que contenha o valor de BIC mais baixo

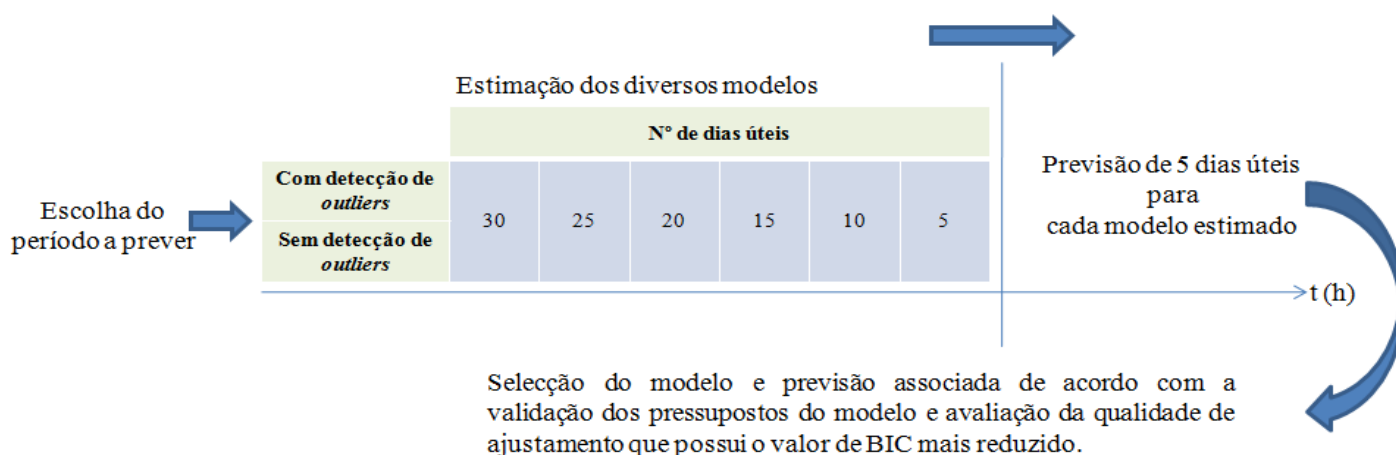
A programação realizada no *software SPSS* teve como intuito efectuar todo o processo de modelação e previsão, sendo ajustados 12 modelos para uma única janela temporal. Assim, será efectuada a estimação de vários modelos com um número distinto de dias úteis para a sucessão cronológica, nomeadamente utilizando valores horários correspondentes a 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias úteis

tanto com detecção de *outliers* para estimação dos parâmetros dos diferentes modelos como sem detecção de *outliers*.

O processo concebido apenas realiza a escolha do modelo mais adequado e a previsão do valor horário de variação conjectural referente a 5 dias úteis. No entanto, para utilizar o processo referido é necessário possuir um conjunto de dados referente a 30 dias úteis a fim de prever os seguintes 5 dias úteis.

De referir, que na presente dissertação foi utilizado um nível de significância de 5% para validação da qualidade de ajustamento e validação dos pressupostos do modelo.

As diferentes fases que compõem o processo de modelação concebido encontram-se descritas esquematicamente na Figura 4.11.



**Figura 4.11-** Representação esquemática das etapas concretizadas pelo processo de modelação concebido.

No ponto seguinte serão abordados casos de estudo utilizando o processo de modelação descrito anteriormente.

## 4.4 – Resultados – 2º Período de Dados

Os resultados apresentados de seguida incidem em primeira instância na abordagem de diversos casos de estudo, seguido de análises referentes a resultados globais e ainda o estudo sobre a aplicabilidade da previsão da variação conjectural na previsão do preço de fecho de mercado.

#### 4.4.1 – Casos de Estudo

Para efeitos de análise será dada ênfase a três casos de estudo realizados, procedendo-se à análise dos resultados obtidos para os mesmos tanto em termos de indicadores de avaliação de qualidade de ajustamento obtidos como em termos de previsão associada. Os casos de estudo abordados foram realizados para o ano de 2011, sendo os mesmos os seguintes:

- Modelação e previsão para o período de 17 de Março a 23 de Março;
- Modelação e previsão para o período de 15 de Julho a 21 de Julho;
- Modelação e previsão para o período de 11 de Outubro a 17 de Outubro.

Para os casos de estudo enunciados acima os modelos obtidos foram todos estimados com detecção de *outliers* e ambos ARIMA com componentes sazonais. No entanto, revelaram-se diferenças quanto ao número de dias úteis utilizados para a estimação do modelo, sendo necessários no primeiro caso 5 dias úteis, no segundo 10 dias úteis e no último 15 dias úteis. Desta forma, pode-se verificar que, dependendo da janela temporal analisada, o modelo seleccionado terá diferentes características.

Na Tabela 4.3 encontram-se em detalhe os resultados referentes à modelação dos três casos de estudo anteriores tendo em consideração os modelos estimados seleccionados.

**Tabela 4.3-** Resultados obtidos após a modelação para os casos de estudo apresentados.

Dados a prever	Número de dias úteis da sucessão cronológica	R <sup>2</sup>	MAPE	BIC	RMSE	Designação do modelo obtido
17 de Março a 23 de Março	5	0,994	0,180	-11,354	0,003	ARIMA(1,1,0)(0,1,0)
15 de Julho a 21 de Julho	10	0,992	0,092	-12,352	0,001	ARIMA(1,0,0)(0,1,1)
11 de Outubro a 17 de Outubro	15	0,986	0,176	-11,572	0,002	ARIMA(2,1,2)(1,0,1)

Analisando os modelos obtidos nos três casos de estudo constatou-se que em ambos os casos os modelos seleccionados necessitam de dados horários referentes no máximo a dois dias anteriores para prever a hora seguinte. Assim, pode-se reconhecer que os modelos que melhor se adequam nos presentes casos de estudo não necessitam de número elevado de dados horários de variação conjectural anteriores para efectuar a previsão horária da mesma.

Como é possível observar, o  $R^2$  obtido em ambos os casos de estudo tem um valor médio de 0,991, já o MAPE apresenta um valor médio de 0,149 e o RMSE um valor médio de 0,002.

A fim de analisar a precisão dos modelos apresentados anteriormente para a previsão procedeu-se à análise da média ( $\bar{E}$ ), desvio padrão ( $S'_e$ ), mínimo e máximo do erro absoluto  $|e_t|$  para a previsão de 1 dia útil (24 horas) e 5 dias úteis (120 horas). Esta abordagem teve como objectivo comparar a precisão da previsão para duas janelas temporais de previsão distintas a fim de concluir sobre qual o período que corresponderá a níveis de previsão melhores. Os resultados obtidos relativamente à previsão para 1 e 5 dias úteis para os diferentes casos de estudo encontram-se em detalhe nas Tabelas 4.4 a 4.5.

**Tabela 4.4-** Resultados obtidos para a previsão de 1 dia para os diferentes casos de estudo.

Dados a prever	Número de dias úteis da sucessão cronológica	Erro ( $ e_t $ ) para 1 dia				Designação do modelo obtido
		$\bar{E}$	$S'_e$	Mín	Máx	
17 de Março a 23 de Março	5	0,05493	0,10068	0,00010	0,31490	ARIMA(1,1,0)(0,1,0)
15 de Julho a 21 de Julho	10	0,00759	0,00673	0,00090	0,02460	ARIMA(1,0,0)(0,1,1)
11 de Outubro a 17 de Outubro	15	0,00743	0,00313	0,00170	0,01560	ARIMA(2,1,2)(1,0,1)

**Tabela 4.5-** Resultados obtidos para a previsão de 5 dias para os diferentes casos de estudo.

Dados a prever	Número de dias úteis da sucessão cronológica	Erro ( $ e_t $ ) para 5 dias				Designação do modelo obtido
		$\bar{E}$	$S'_e$	Mín	Máx	
17 de Março a 23 de Março	5	0,02678	0,04703	0,00010	0,31490	ARIMA(1,1,0)(0,1,0)
15 de Julho a 21 de Julho	10	0,01080	0,01289	0,00040	0,07890	ARIMA(1,0,0)(0,1,1)
11 de Outubro a 17 de Outubro	15	0,00950	0,00967	0,00090	0,05380	ARIMA(2,1,2)(1,0,1)

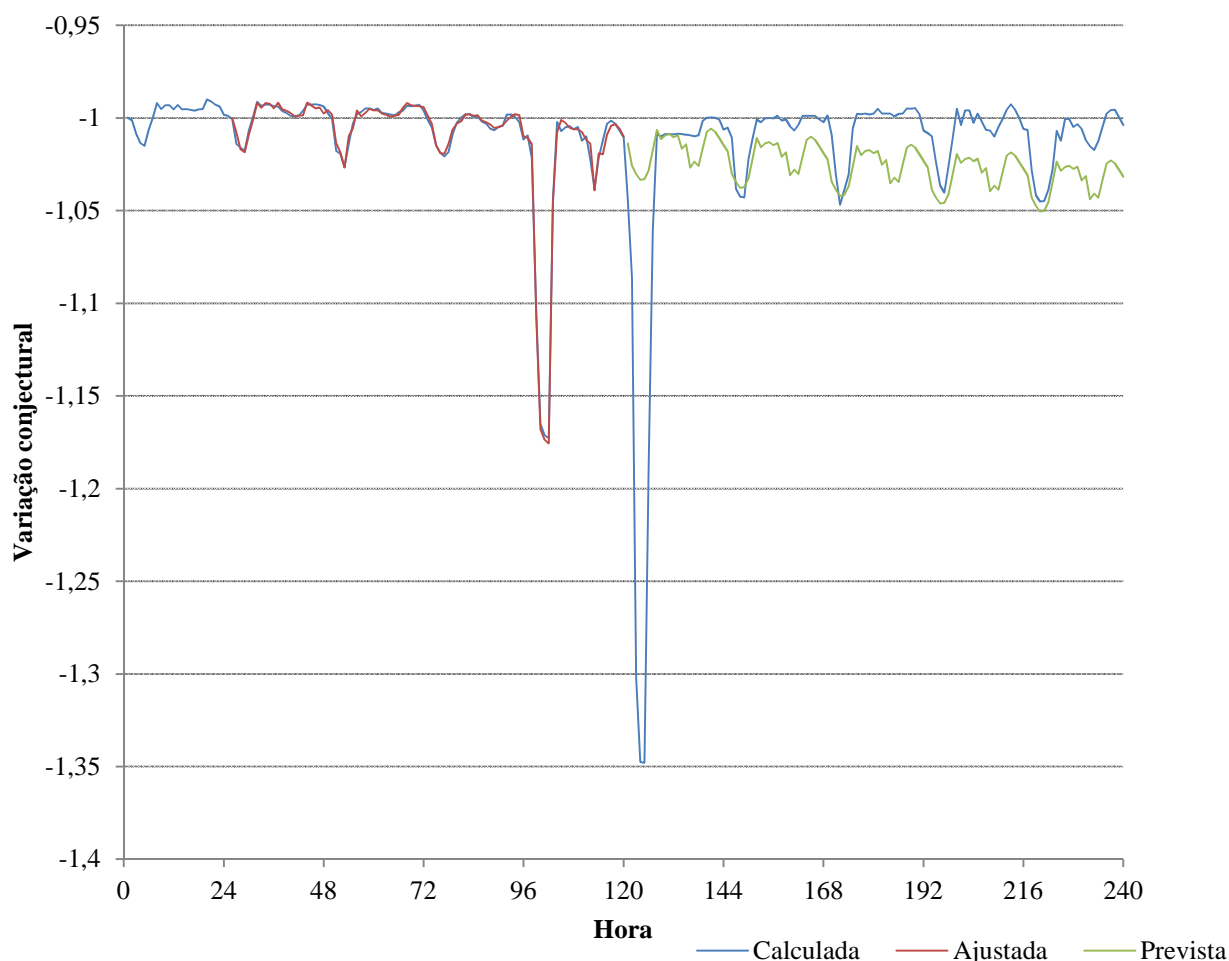
Pelos resultados indicados, observa-se que em termos de erro médio absoluto e do seu desvio padrão, o modelo obtido para o primeiro caso de estudo contem uma previsão melhor para 5 dias úteis do que para 1 dia útil. No entanto, nos restantes casos de estudo o contrário já acontece, pois a previsão é mais exacta para 1 dia útil do que para 5 dias úteis, como seria de esperar, uma vez, que à medida que horizonte de previsão aumenta menor tenderá a ser a precisão da previsão.

A conclusão retirada para o primeiro caso de estudo deve-se essencialmente ao facto de existir um aumento acentuado na competitividade no primeiro dia de previsão (decréscimo da variação conjectural), observando-se assim um erro elevado de previsão nesse período. Este, irá influenciar as medidas referentes à previsão de 1 dia útil, e sendo o mesmo atenuado pelas previsões realizadas após esse acontecimento conclui-se, que para 5 dias úteis existe uma melhor previsão em termos de erro médio absoluto e desvio padrão associado.

Pode-se ainda constatar que os erros médios absolutos para os três casos de estudo abordados, tanto para 1 dia útil como para 5 dias úteis são reduzidos, podendo-se referir que os modelos seleccionados se adequam satisfatoriamente em média aos valores observados para o período previsto, revelando assim boas capacidades preditivas.

A análise gráfica dos resultados obtidos para os modelos seleccionados, quer em termos de estimação, quer em termos de previsão, comparativamente aos dados de variação conjectural calculados é de grande importância, permitindo obter uma visão global sobre o desempenho do modelo seleccionado.

A representação gráfica da previsão realizada pelo modelo seleccionado, o ajuste efectuado pelo modelo aos dados da sucessão cronológica usada para estimação e os dados de variação conjectural calculados para os três casos de estudo encontram-se representados nas Figuras 4.12 a 4.14 respectivamente.



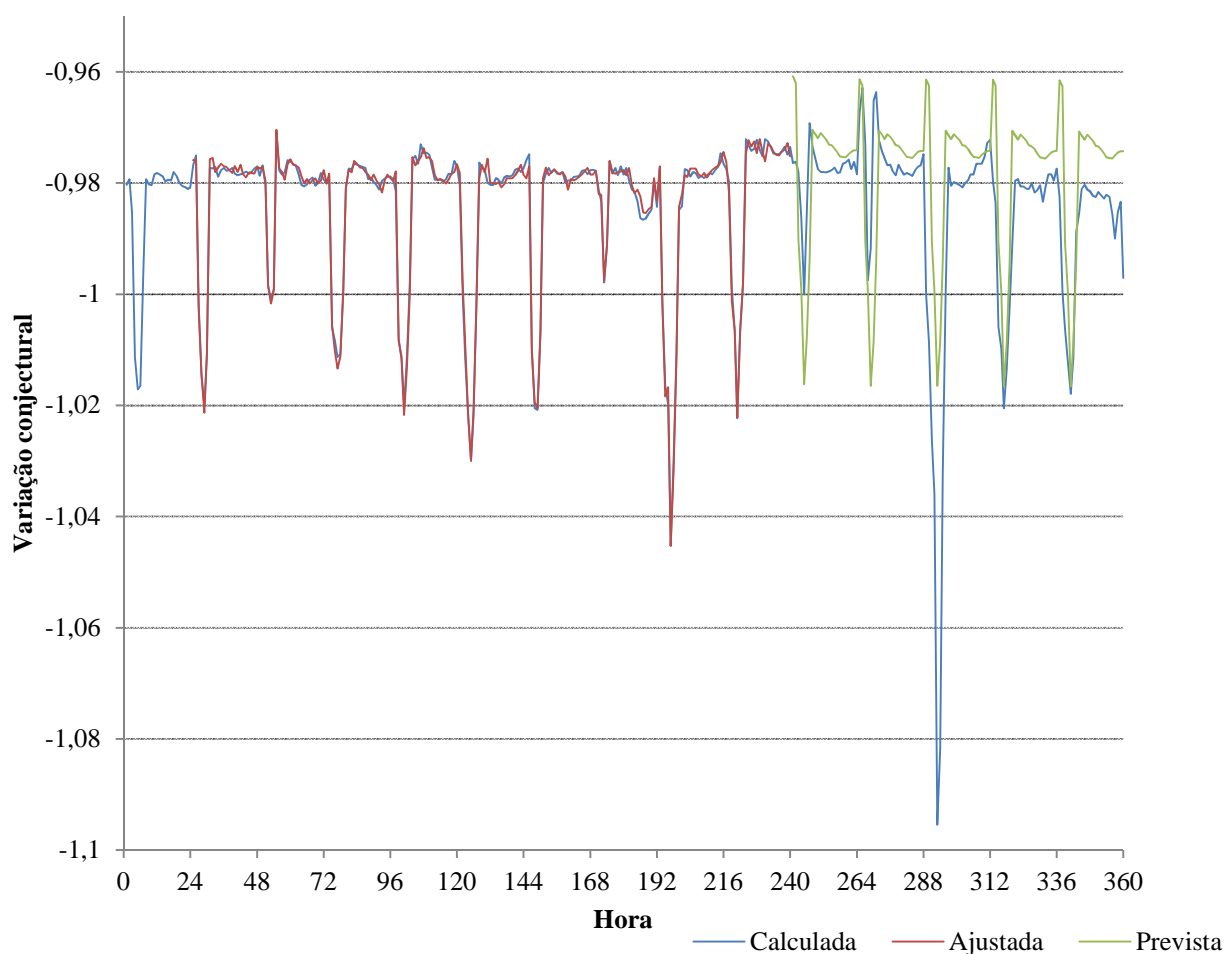
**Figura 4.12-** Variação conjectural calculada, ajustada e prevista para o modelo seleccionado no estudo de 17 de Março a 23 de Março de 2011.

Pela figura acima pode-se verificar que para a janela referente ao primeiro caso de estudo a variação conjectural apresenta um padrão característico, à excepção dos dois decréscimos acentuados de variação conjectural registados. No entanto, a previsão realizada apresenta uma característica decrescente apesar

### Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores

da variação conjectural calculada para esse período apresentar um comportamento mais estável. O facto de a previsão apresentar um efeito decrescente deve-se em parte à existência desse comportamento nos dados utilizados para estimar modelo influenciando a mesma.

Os dois decréscimos acentuados registados acima devem-se à existência nesses períodos de um preço de fecho de mercado muito reduzido verificando-se um aumento abrupto da competitividade dos agentes produtores no MIBEL.

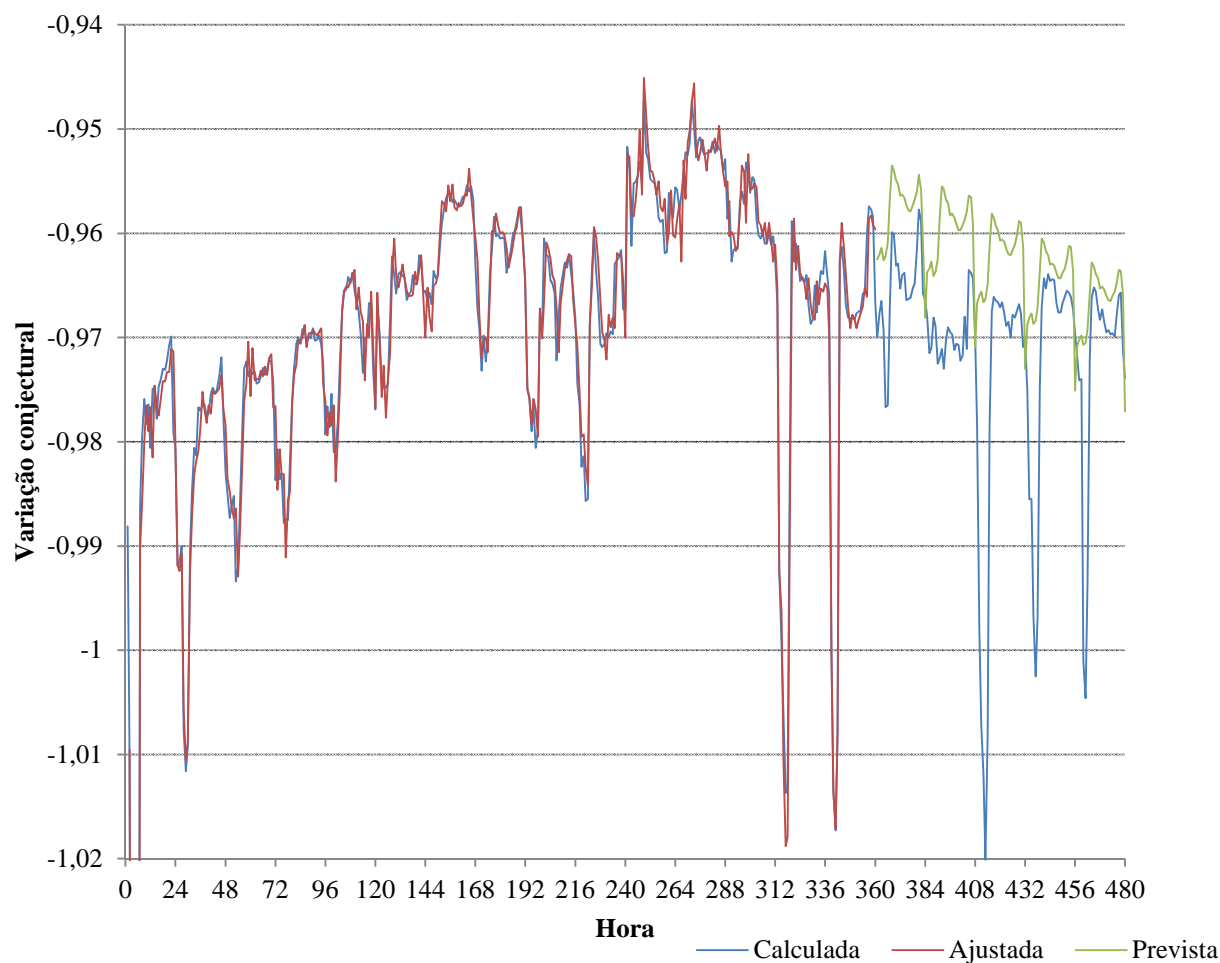


**Figura 4.13-** Variação conjectural calculada, ajustada e prevista para o modelo seleccionado no estudo de 15 de Julho a 21 de Julho de 2011.

Em coerência com o caso anterior, no segundo estudo verifica-se igualmente a existência de um comportamento padronizado. No presente caso de estudo é possível verificar contudo, um decréscimo mais acentuado de variação conjectural no padrão observado.

Tal como no caso anterior os decréscimos de variação conjectural registados no padrão ocorrem nas horas de vazio onde o preço de fecho de mercado reduz substancialmente e a competitividade do mercado aumenta.

A previsão registada apresenta uma boa aproximação à excepção do decréscimo abrupto registado nos dados de variação conjectural calculados.



**Figura 4.14-** Variação conjectural calculada, ajustada e prevista para o modelo seleccionado no estudo de 11 de Outubro a 17 de Outubro de 2011.

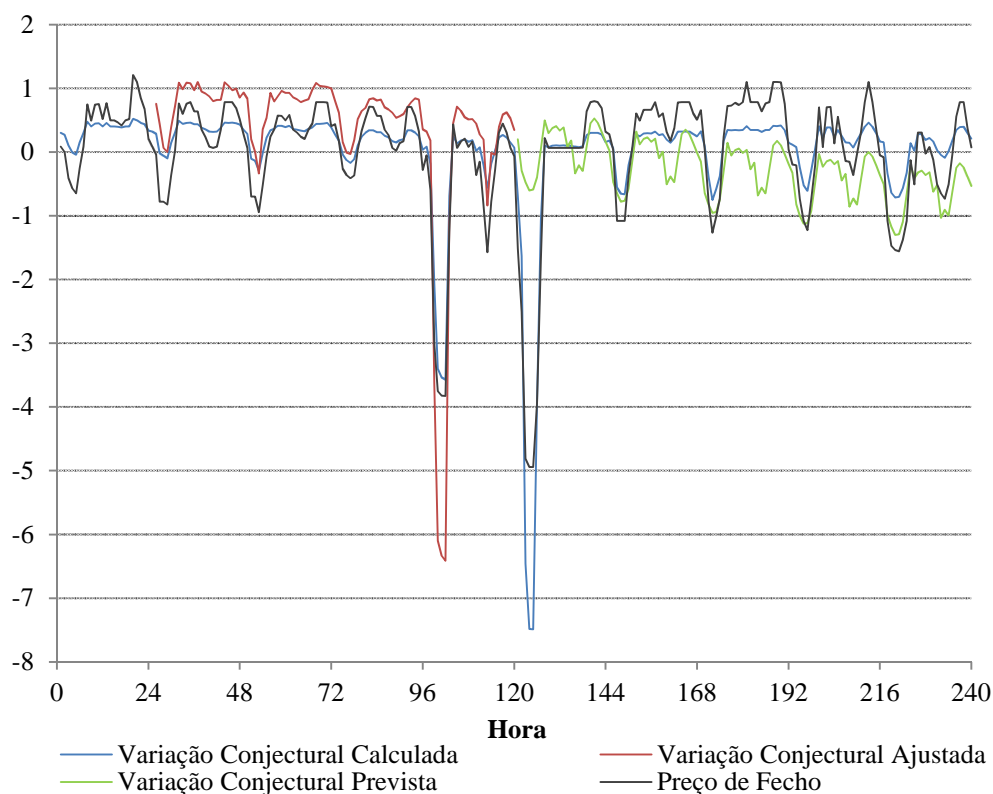
Para o terceiro caso, ao contrário dos casos de estudo anteriores, o período de variação conjectural observado na figura acima apresenta grande volatilidade e instabilidade não sendo observado um padrão tão constante no mesmo. Desta forma, o modelo tem dificuldade em realizar a previsão para este período devido à instabilidade observada.

Após a análise da previsão obtida nos três casos de estudo pode-se referir, tal como seria de esperar, que a mesma encontra-se muito dependente dos dados utilizados para estimação do modelo, tendendo a adoptar o comportamento descrito pelos mesmos.

Por outro lado, foi possível verificar que os modelos estimados contêm dificuldade para prever as horas de vazio onde são registados decréscimos abruptos da variação conjectural.

A variação conjectural tende a acompanhar a oscilação existente no preço de fecho de mercado, uma vez que a mesma é calculada tendo em consideração o mesmo.

Com a finalidade de se observar que a variação conjectural adopta uma volatilidade e comportamento semelhantes ao preço de fecho de mercado realizou-se a standardização da variação conjectural calculada, ajustada e prevista e do preço de fecho de mercado observado para o primeiro caso de estudo. A representação gráfica encontra-se em detalhe na Figura 4.15.



**Figura 4.15-** Variação conjectural calculada, ajustada, prevista e preço de fecho estandardizados para o período de 17 de Março a 23 de Março de 2011.

Pela representação anterior pode-se verificar tal como referido que o padrão descrito pelo preço de fecho de mercado e variação conjectural estimada, prevista e calculada são semelhantes entre si. Desta forma, a variação conjectural acompanha o comportamento descrito pelo preço de fecho. Segundo este facto poder-se-á reflectir sobre a utilidade da variação conjectural prevista pelo processo desenvolvido para o cálculo do preço de fecho previsto. Tal estudo encontra-se descrito em detalhe mais à frente na presente dissertação (secção 4.4.3).

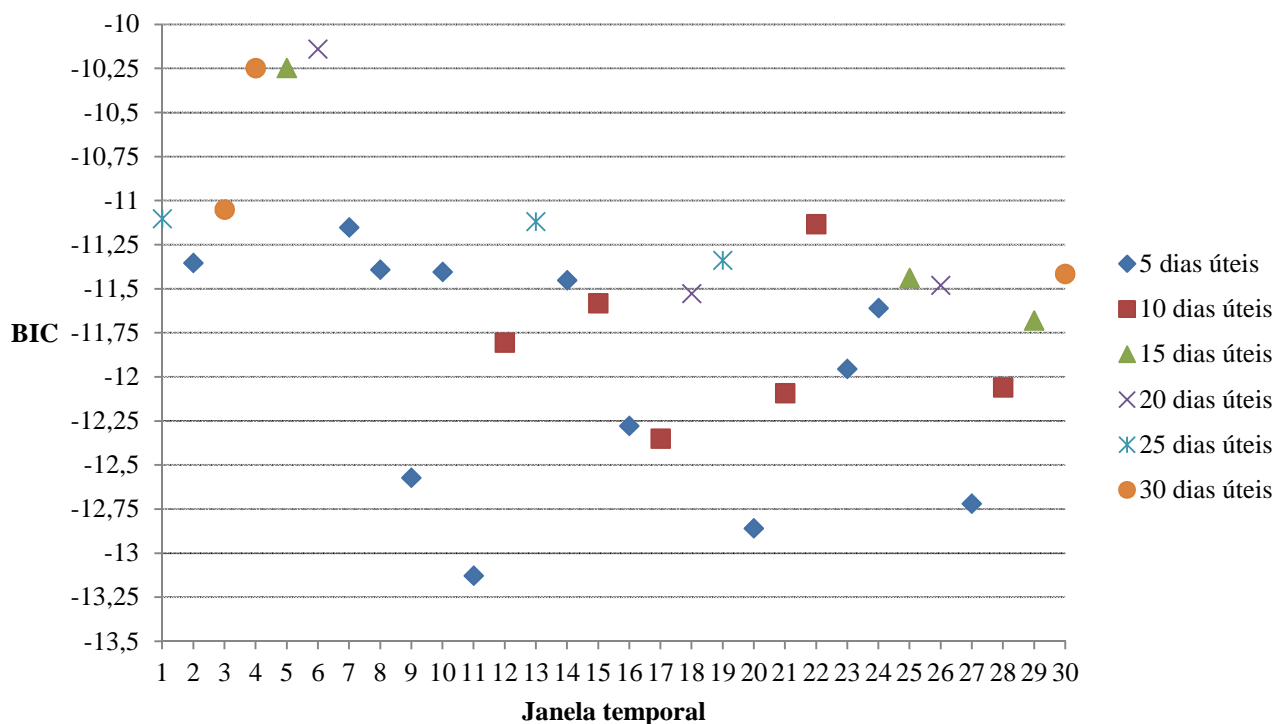
#### **4.4.2 – Resultados Globais**

A fim de permitir conclusões globais do estudo em análise procedeu-se à previsão horária da variação conjectural no MIBEL para 30 janelas temporais distintas. Para tal, foram utilizados dados de variação conjectural para o ano de 2011 pelos motivos já indicados anteriormente. Os resultados referentes às 30 janelas temporais abordadas encontram-se em detalhe nas Tabelas A.1 e A.2 presentes no Anexo 1 desta dissertação.

Pela análise dos diferentes modelos seleccionados para as 30 janelas temporais abordadas, constatou-se que 27 destes modelos foram do tipo ARIMA sazonal com sazonalidade diária. Os restantes 3 modelos seleccionados foram do tipo ARIMA não sazonal, devido em parte à existência de grande volatilidade nas sucessões cronológicas utilizadas nestes períodos não sendo detectável qualquer componente sazonal.

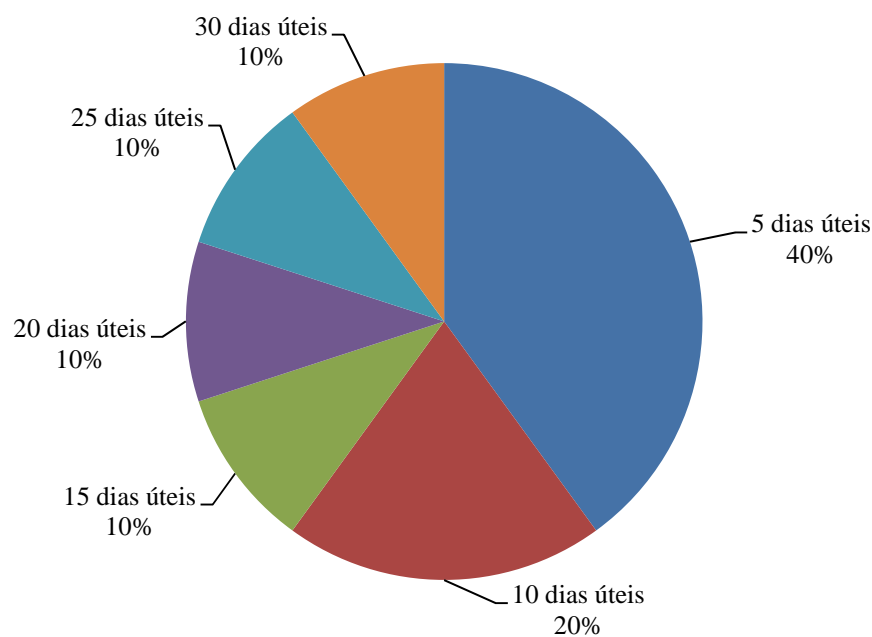
Realizando a análise das diferentes janelas temporais foi possível observar que à medida que se aumenta a dimensão da sucessão cronológica utilizada para estimação dos modelos, ocorre a diminuição da qualidade de ajustamento. Tal, deve-se ao facto de ter sido verificado que são seleccionados preferencialmente modelos estimados com sucessões cronológicas de dimensão mais reduzida. Assim, à medida que se aumenta a dimensão da sucessão cronológica para a estimação do modelo é menos provável que este modelo seja seleccionado como o melhor sendo o ajustamento mais difícil. Na Figura 4.16 encontra-se a representação do valor de BIC registado em função do modelo seleccionado, podendo ser visível que foram maioritariamente seleccionados modelos utilizando apenas uma sucessão cronológica de 5 dias úteis para estimação.

*Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores*



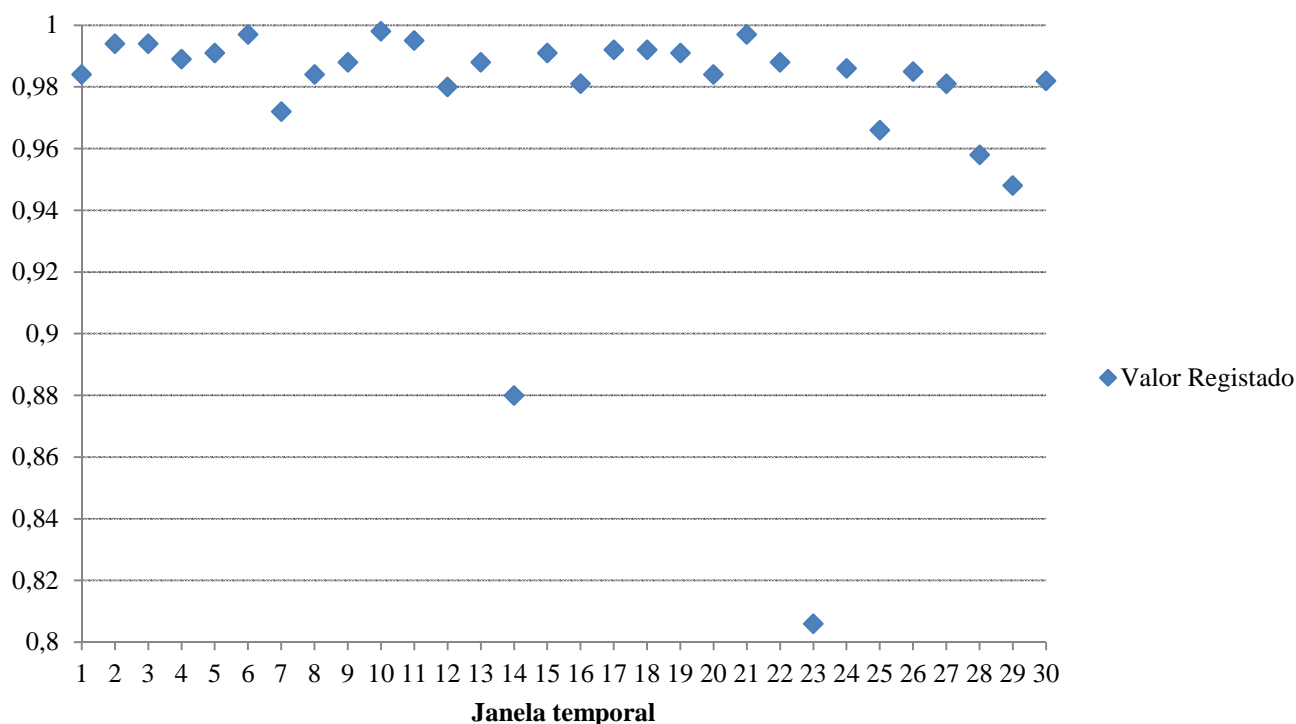
**Figura 4.16-** Valor de BIC registado pelos modelos seleccionados para as 30 janelas temporais estudadas, em função da dimensão da sucessão cronológica.

Concluindo, na totalidade das janelas temporais estudadas, cerca de 60% dos modelos seleccionados foram estimados utilizando uma sucessão cronológica dotada de 5 ou 10 dias úteis podendo tal ser observado pela Figura 4.17.



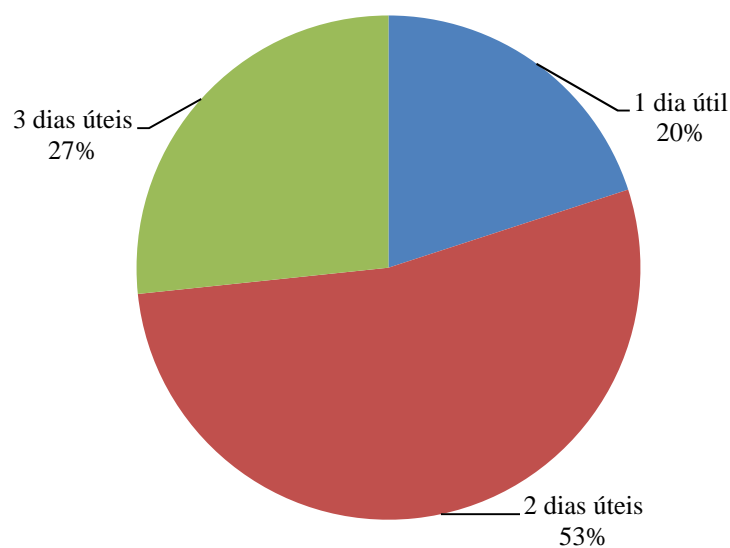
**Figura 4.17-** Percentagem da dimensão da sucessão cronológica em função das 30 janelas temporais analisadas.

Pela análise da avaliação da qualidade de ajustamento dos diversos modelos seleccionados, foi obtido um  $R^2$  médio no valor de 0,975, com um máximo de 0,998 e um mínimo de 0,806. Desta forma, em média os resultados obtidos para a avaliação da qualidade de ajustamento em função do valor de  $R^2$  obtido é muito bom. A oscilação do valor de  $R^2$  registado para as diferentes janelas temporais pode ser observado na Figura 4.18.



**Figura 4.18-** Valores de  $R^2$  registados para as diferentes janelas temporais.

Em termos de previsão, foi possível constatar que os modelos seleccionados para as diferentes janelas temporais necessitam de dados horários de variação conjectural até 3 dias úteis anteriores por forma a prever o valor de variação conjectural numa determinada hora. Por outro lado, ainda foi verificado que preferencialmente são seleccionados modelos que necessitam de dados correspondentes até 2 dias úteis para prever uma determinada hora, seguido de modelos que necessitam de dados referentes até 3 dias úteis e por fim modelos que necessitam de dados correspondentes até 1 dia útil anterior. Na Figura 4.19 encontra-se a representação deste facto.



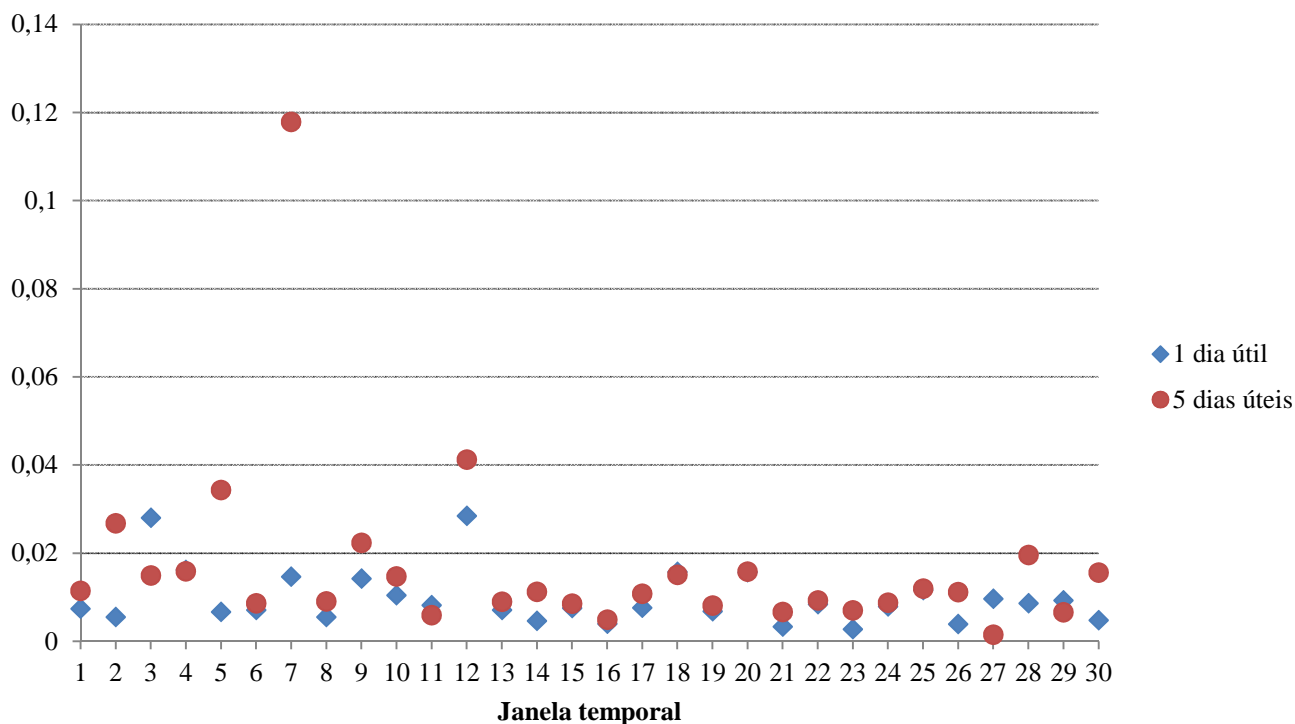
**Figura 4.19-** Percentagem do número de dias úteis que os modelos seleccionados para as 30 janelas temporais necessitam para realizar a previsão.

Realizada análise do erro médio absoluto, foi possível verificar que o mesmo adopta usualmente um valor inferior para a previsão com o horizonte de 1 dia útil em relação à previsão realizada para 5 dias úteis.

Concluindo, o estudo revela que a previsão é em média mais precisa para 1 dia útil do que para 5 dias úteis. Desta forma, devem ser utilizados preferencialmente os valores previstos para um horizonte temporal de 1 dia útil a fim de obter resultados mais precisos.

No entanto, apesar de se constatar uma previsão mais precisa para 1 dia útil do que para 5 dias úteis, foi possível constatar que de um modo geral o erro médio absoluto para a previsão de 5 dias úteis é similar ao erro registado para a previsão de 1 dia útil.

Os valores registados para o erro médio absoluto para 1 dia útil e 5 dias úteis, para as 30 janelas temporais abordadas encontram-se representados na Figura 4.20.



**Figura 4.20-** Erro médio absoluto para 1 e 5 dias úteis registados nas 30 janelas temporais estudadas.

A fim de constatar a utilidade da previsão horária da variação conjectural no MIBEL foi realizado o estudo da previsão do preço de fecho de mercado associado, encontrando-se o mesmo em detalhe de seguida.

#### 4.4.3 – Aplicação no Estudo da Previsão do Preço de Fecho de Mercado

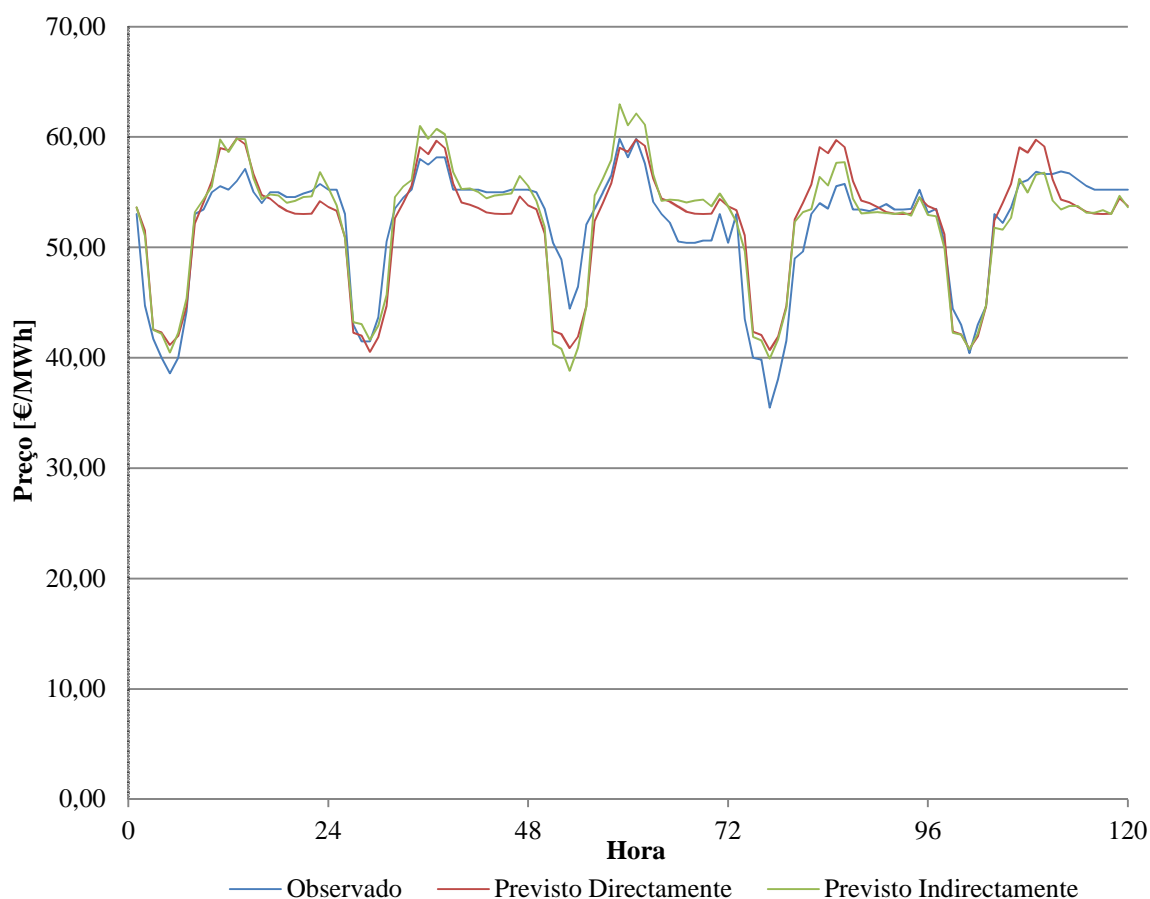
Para analisar a utilidade de aplicação dos dados obtidos através da previsão de variação conjectural do MIBEL realizada pela análise de sucessões cronológicas, foi estudada a sua aplicação para prever o respectivo preço de fecho de mercado associado. Para isso, foi realizado o estudo da previsão do preço de fecho de mercado tendo em consideração as 30 janelas temporais estudadas no ponto anterior.

Na presente análise, foram estudadas duas abordagens distintas, em primeiro lugar foi realizado o cálculo o preço de fecho previsto através da variação conjectural prevista para as 30 janelas temporais. Os valores preço previstos foram assim calculados através do simulador SiMEC v3.0 em modo de previsão, realizando desta forma a previsão indirecta do preço.

## Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores

Posteriormente, para se realizar o teste sobre a validade do método indicado anteriormente, foi efectuada a previsão directa do preço de fecho de mercado realizando a estimação de modelos pela análise de sucessões cronológicas com detecção e tratamento de *outliers* de acordo com as dimensões de sucessões cronológicas dadas como melhores para cada uma das 30 janelas temporais, utilizando para este efeito dados horários do preço de fecho de mercado diário do MIBEL.

Na Figura 4.21 pode-se ser observado a representação gráfica da previsão directa, indirecta e os dados observados para uma das janelas temporais.



**Figura 4.21-** Preço de fecho de mercado observado, previsto directamente e previsto indirectamente para o período de 8 de Julho a 14 de Julho de 2011.

Pela análise da representação gráfica anterior é possível observar que as previsões realizadas pelos diferentes processos conseguem aproximar-se dos valores reais de preço de fecho de mercado.

Para constatar a qualidade de ambos os processos, foram realizados testes a fim de observar se existiria vantagem em escolher um dos dois métodos descritos tanto para a previsão de 1 dia útil como para a previsão de 5 dias úteis.

Tratando-se de um estudo tendo como referência a previsão directa e indirecta do preço de fecho de mercado, diz-se que as amostras em estudo são emparelhadas, pois está-se perante duas variáveis correspondentes a uma amostra de indivíduos comuns.

Em primeiro lugar verificou-se se, em média, o erro absoluto previsto directamente seria diferente do erro previsto indirectamente. O cálculo do erro médio absoluto para 1 e 5 dias úteis para as diferentes janelas temporais foram calculados segundo as expressões 4.3 e 4.4 respectivamente:

$$EMA_{1dd, 1di} = \frac{\sum_{i=1}^{24} (|P_{obs} - P_{d,i}|)}{24} \quad (4.3)$$

$$EMA_{5dd, 5di} = \frac{\sum_{i=1}^{120} (|P_{obs} - P_{d,i}|)}{120} \quad (4.4)$$

Em que:

$EMA_{1dd, 1di}$  – erro médio absoluto correspondente à previsão directa ou indirecta respectivamente, para 1 dia útil;

$EMA_{5dd, 5di}$  – erro médio absoluto correspondente à previsão directa ou indirecta respectivamente, para 5 dias úteis;

$P_{obs}$  – preço observado;

$P_{d,i}$  – preço previsto directamente ou indirectamente respectivamente.

Assim, para verificar se em média o erro absoluto obtido para a totalidade dos casos de estudo é significativamente diferente entre os dois processos, realizaram-se testes paramétricos para comparar as duas populações a partir de amostras emparelhadas.

## Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores

O teste paramétrico realizado tratou-se de um teste *t-student* para comparar os erros médios absolutos obtidos pela previsão directa ( $\mu_{e,d}$ ) e pela previsão indirecta ( $\mu_{e,i}$ ). Assim, realizou-se o seguinte teste de hipóteses:

$$H_0: \mu_{e,d} = \mu_{e,i} \quad (4.5)$$

$$H_1: \mu_{e,d} \neq \mu_{e,i} \quad (4.6)$$

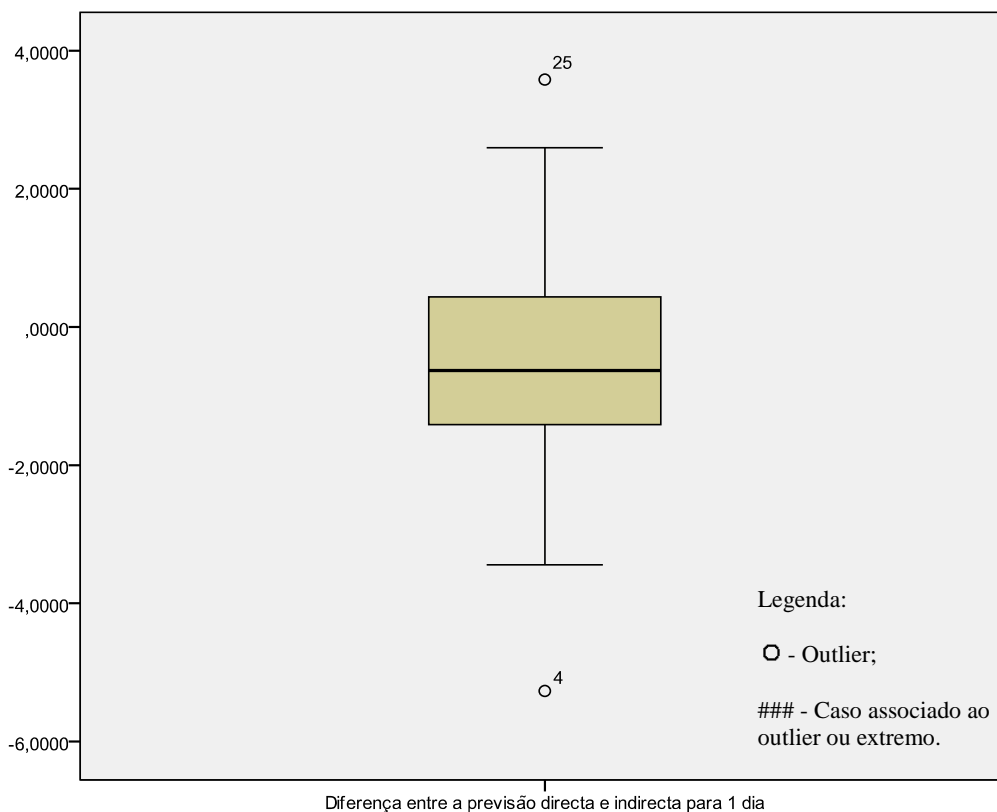
Para o teste de hipóteses enunciado previamente foi considerado um nível de significância de 5%.

A aplicação de testes paramétricos exige que a variável dependente em estudo necessita de possuir uma distribuição Normal.

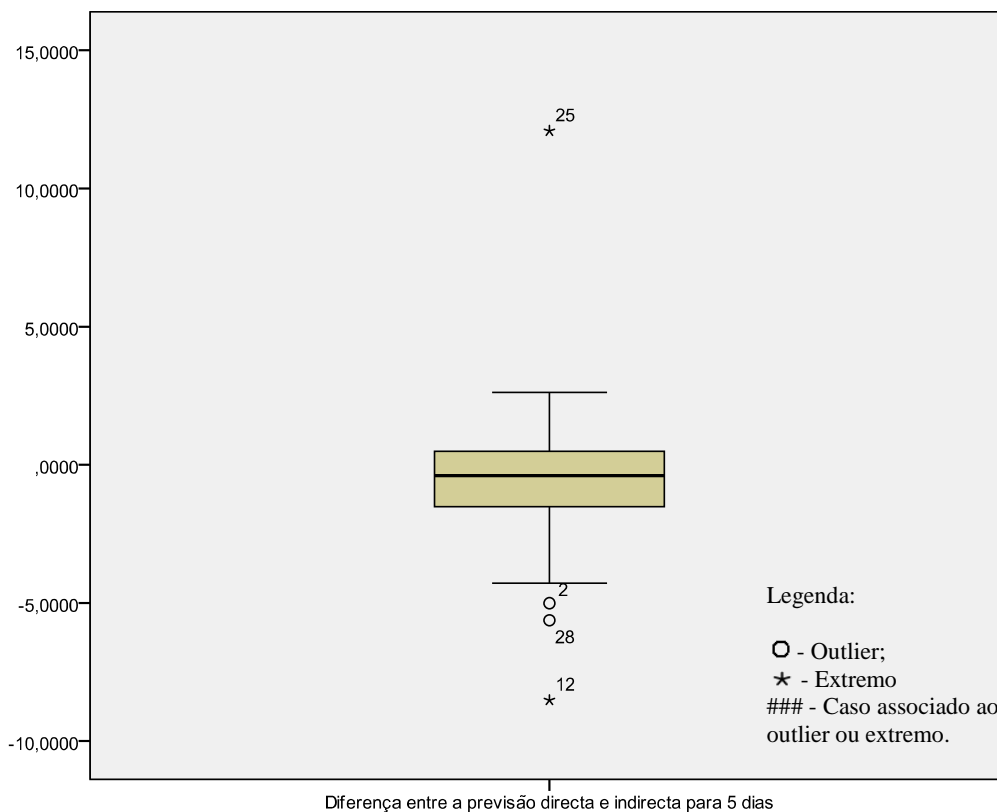
Para testar a normalidade pode-se utilizar o teste de Kolmogorov-Smirnov e o teste de Shapiro-Wilk. O primeiro é aconselhado para amostras de dimensão igual ou superior a 30, já o segundo é aconselhado para amostras inferiores a 30.

No presente caso encontrando-se a analisar valores médios procedeu-se à verificação da normalidade retirando os *outliers* do conjunto de amostras. A opção tomada teve em consideração o facto de a média se tratar de uma medida muito sensível à presença de *outliers*.

A análise da normalidade foi efectuada para a diferença entre o erro médio absoluto proveniente da previsão directa e o erro médio absoluto proveniente da previsão indirecta. Assim, para observar a eventual presença de *outliers* ou extremos procedeu-se à análise dos diagramas de caixas tanto para 1 dia útil como para 5 dias úteis. Os respectivos diagramas de caixas encontram-se representados nas Figuras 4.22 e 4.23.



**Figura 4.22-** Diagrama de caixas referente à diferença entre os erros médios absolutos para 1 dia útil provenientes da previsão directa e indirecta para os 30 casos de estudo.



**Figura 4.23-** Diagrama de caixas referente à diferença entre os erros médios absolutos para 5 dias úteis provenientes da previsão directa e indirecta para os 30 casos de estudo.

## Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores

Tal como se pode observar na Figura 4.22 no caso de 1 dia útil constatou-se a presença de dois *outliers*, em contrapartida no caso da análise para 5 dias úteis pela Figura 4.23 verificaram-se dois *outliers* e dois extremos. Analisando os diagramas de caixas presentes anteriormente pode-se referir que mesmo com a presença de *outliers* não se verificam desvios severos em relação à normalidade. No entanto, foi contemplada a remoção dos *outliers* para testar a normalidade.

Com a remoção dos *outliers* o número de amostras foi reduzido. Assim, o número de amostras para a análise de 1 dia útil foi reduzido para 28 e no caso da análise de 5 dias úteis para 26. Deste modo, sendo o número de amostras inferior a 30 procedeu-se à utilização do teste Shapiro-Wilk para testar a normalidade. Para tal foi considerado o seguinte teste de hipóteses:

$$H_0: \text{A amostra provem de uma população Normal} \quad (4.7)$$

$$H_1: \text{A amostra não provem de uma população Normal} \quad (4.8)$$

Realizando o teste de Shapiro-Wilk para ambas as análises observou-se que para um nível de significância de 1% a diferença entre os erros médios absolutos provenientes da previsão directa e indirecta para ambas as análises a normalidade é verificada.

Averiguadas as condições necessárias, após a realização do teste de *t-student* tanto na situação de análise para 1 dia útil como para 5 dias úteis constatou-se a não rejeição da hipótese nula. Desta forma, em ambos os casos o erro absoluto em média obtido pela previsão directa é igual ao erro absoluto em média obtido para a previsão indirecta. Assim, pode-se concluir que em média o erro absoluto obtido para os dois casos é igual entre si não existindo vantagem em escolher um método específico para previsão do preço de fecho de mercado. Os resultados referentes ao teste *t-student* realizado encontram-se na Tabela 4.6:

**Tabela 4.6-** Resultados obtidos no teste *t-student* para 1 e 5 dias úteis.

Nível de significância	Previsão de 1 dia útil		Previsão de 5 dias úteis	
	Estatística de teste t	p-value	Estatística de teste t	p-value
5%	-1,616	0,117	-1,128	0,269

Posteriormente ao estudo anterior procedeu-se à realização do teste de Wilcoxon. O teste de Wilcoxon trata-se de um teste não paramétrico que permite comparar populações a partir de duas amostras emparelhadas. O teste de Wilcoxon pode ser utilizado como alternativa não paramétrica ao teste *t-student* quando o pressuposto de distribuição Normal da variável das duas medições não se verifica e/ou não é possível ou desejável defender a robustez dos métodos paramétricos quando este pressuposto não é válido.

A utilização do teste de Wilcoxon teve assim como objectivo efectuar um teste mais robusto no que respeita à presença de *outliers* relativamente ao teste efectuado previamente. No presente estudo ao contrário de se analisar a diferença entre os dois processos de previsão através do valor médio procedeu-se à análise relativamente à mediana, pois a mesma não é tão sensível à presença de *outliers* e extremos. Assim, foi realizada a comparação entre a mediana referente à previsão directa do preço ( $M_{e,d}$ ) e a mediana para a previsão indirecta do preço ( $M_{e,i}$ ), considerando para tal o teste de hipóteses indicado:

$$H_0: M_{e,d} = M_{e,i} \quad (4.9)$$

$$H_1: M_{e,d} \neq M_{e,i} \quad (4.10)$$

Realizado o teste de Wilcoxon para um nível de significância de 5% foi possível verificar o resultado obtido anteriormente, não existindo qualquer vantagem em escolher um dos processos em detrimento do outro. Os resultados obtidos para o teste Wilcoxon encontram-se em detalhe na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7-** Resultados obtidos no teste Wilcoxon para 1 e 5 dias úteis.

Nível de significância	p-value	
	Previsão de 1 dia útil	Previsão de 5 dias úteis
5%	0,069	0,111

Pelos testes realizados foi possível assim constatar que a previsão directa e indirecta do preço de fecho de mercado produzem em média erros absolutos que são aproximadamente iguais entre si. Assim, a utilização dos dados obtidos pela previsão da variação conjectural pelo processo concebido representa uma solução viável para prever o preço de fecho de mercado associado.

### *Previsão da Competitividade dos Agentes Produtores*

As estatísticas de teste dos testes Shapiro-Wilk, *t-student* e testes de Wilcoxon realizados encontram-se em detalhe no Anexo 2 da presente dissertação. Os *outputs* referentes aos testes Shapiro-Wilk, *t-student* e testes de Wilcoxon encontram-se igualmente em detalhe no Anexo 2 da presente dissertação, nomeadamente nas Tabelas A.3 e A.4, Tabelas A.5 e A.6, e Tabelas A.7 e A.8 respectivamente.





---

## **Capítulo 5**

---

### **Conclusões**

*No presente capítulo são apresentadas as conclusões retiradas ao longo do desenvolvimento desta dissertação. São abordadas ainda, algumas sugestões para futuro desenvolvimento do trabalho apresentado.*



## 5 – Conclusões

O estudo efectuado centrou-se na modelação e respectiva previsão horária das estratégias competitivas dos agentes produtores no MIBEL com base na análise de sucessões cronológicas, utilizando como variável em estudo a variação conjectural do próprio MIBEL obtida pela solução do modelo de variações conjecturais.

Ao longo do desenvolvimento do presente estudo foram utilizadas várias abordagens no que diz respeito à dimensão da sucessão cronológica utilizada a fim de estimar o modelo de previsão, bem como ao tipo de previsão a realizar. Posteriormente, foi realizado um processo para previsão de 5 dias úteis. O tipo de modelos contemplados foi do tipo de alisamento exponencial e ARIMA sazonal e não sazonal. O processo concebido realiza a estimação de modelos utilizando sucessões cronológicas dotadas de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias úteis, sendo estimados 6 modelos com detecção e tratamento de *outliers* e estimados 6 modelos sem detecção e tratamento de *outliers* escolhendo o modelo mais adequado de acordo com os resultados obtidos pela estimação dos mesmos.

A existência de grande volatilidade no nível competitivo descrito pelos produtores de energia eléctrica no mercado diário do MIBEL foi presenciada, podendo ser ainda observável um comportamento similar ao registado pelo preço de fecho de mercado associado. No entanto, apesar da volatilidade observada constatou-se a existência de sazonalidade com flutuação diária, apresentando assim um comportamento que apesar de oscilatório é dotado de um padrão diário.

Relativamente aos resultados provenientes da estimação para 30 janelas temporais em termos de avaliação da qualidade de ajustamento, foi obtido um valor de  $R^2$  médio de 0,975, mínimo de 0,806 e máximo de 0,998, revelando-se como positivos, já que em média 97,5% da variabilidade registada é explicada pelos modelos seleccionados. Desta forma, os modelos seleccionados pelo processo concebido, apresentam um bom ajustamento às sucessões cronológicas utilizadas para os estimar.

## *Conclusões*

Pelo estudo de 30 janelas temporais distintas foi observado que maioritariamente modelos do tipo ARIMA sazonal (27 janelas temporais) apresentam melhores resultados de estimação, seguido de modelos do tipo ARIMA não sazonal (3 janelas temporais), não tendo sido assim, registada qualquer vantagem no uso de modelos do tipo alisamento exponencial.

Foi possível concluir ainda que a detecção e tratamento dos *outliers* presentes na sucessão cronológica contribui positivamente para a estimação de modelos, uma vez que todos os modelos seleccionados foram estimados tendo em conta esta abordagem.

Para as janelas temporais abordadas, observou-se que à medida que se aumenta a dimensão da sucessão cronológica utilizada para estimação do modelo, ocorre a diminuição da qualidade de ajustamento. Desta forma, dentro das 30 janelas temporais abordadas cerca de 40% dos modelos seleccionados foram estimados utilizando uma sucessão cronológica composta por cinco dias úteis e 20% foram estimados utilizando uma sucessão cronológica composta por 10 dias úteis. Quanto às dimensões referentes a 15, 20, 25 e 30 dias úteis, cada uma destas proporcionou 10% dos modelos seleccionados. Assim, o comportamento estratégico dos agentes produtores no MIBEL registado nos 5 dias úteis imediatamente anteriores ao período de previsão conduz maioritariamente a modelos melhores em termos de estimação.

Realizada a análise de casos de estudo, concluiu-se, que a previsão da variação conjectural efectuada tem dificuldades em acompanhar os valores calculados nas horas de vazio, nomeadamente aquando a ocorrência de um aumento acentuado da competitividade dos agentes produtores no MIBEL.

Constatou-se ainda pelos modelos seleccionados que no máximo seriam necessários dados horários correspondentes a 3 dias úteis anteriores em ordem a prever uma determinada hora. Assim, em 20% dos casos abordados seriam necessários dados horários correspondentes a 1 dia útil, em 53% dos casos dados correspondentes a 2 dias úteis e em 27% dos casos dados correspondentes a 3 dias úteis em ordem a prever numa determinada hora o valor de variação conjectural.

Foi verificado em termos de erro médio absoluto, que a previsão realizada com o horizonte temporal de 1 dia útil normalmente é mais precisa relativamente à previsão realizada para um horizonte temporal de 5 dias úteis.

Por fim, a utilidade em empregar os dados previstos de variação conjectural do MIBEL na posterior previsão horária do preço de fecho de mercado tendo em conta as 30 janelas temporais abordadas foi observada. Desta forma, concluiu-se que para um nível de significância de 1% em média o erro médio absoluto é igual para a previsão directa do preço utilizando a análise de sucessões cronológicas e para a previsão do preço pelo cálculo com recurso aos dados de variação conjectural previstos. Assim, concluiu-se que a utilização dos dados de variação conjectural previstos pelo processo concebido corresponde a uma solução viável para prever o preço de fecho de mercado horário associado.

De acordo com os resultados obtidos no estudo realizado, recomenda-se a análise da previsão da variação conjectural referente ao MIBEL para fins-de-semana e feriados de forma a retirar conclusões sobre as estratégias competitivas dos agentes produtores para este caso.

Sugere-se ainda em termos de perspectiva de trabalho futuro, a análise detalhada do comportamento registado pelos agentes produtores no MIBEL nas horas de vazio, realizando o estudo dos factores predominantes que originam à ocorrência neste período do aumento abrupto do nível competitivo registado.



**Referências**

**Bibliográficas**



## Referências Bibliográficas

Bastian, J., Zhu, J., Banunarayanan, V. e Mukerji, R. (1999), “Forecasting Energy Prices in a Competitive Market”, *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 12, No. 3, pp. 40-45.

Bunn, D.W. (2000), “Forecasting Loads and Prices in Competitive Power Markets”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No. 2, pp. 163-169.

Catalão, J. (2006), “Novas Metodologias de Optimização em Sistemas de Energia Hidrotérmicos”, *Dissertação para Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica*, Universidade da Beira interior.

Catalão, J., Mariano, S. J. P., Mendes, V.M.F. e Ferreira, L.A.F.M. (2009), “Unit Commitment in a Competitive and Emission Constrained Environment”, *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 7, No. 5, pp. 560-568.

Conejo, A.J., Plazas, M.A., Espinola, R., e Molina, A.B. (2005), “Day-ahead Electricity Price Forecasting Using the Wavelet Transform and ARIMA Models”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 1035 -1042.

Contreras, J., Espinola, R., Nogales, F.J. e Conejo, A.J. (2003), “ARIMA Models To Predict Next-Day Electricity Prices”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 18, No. 3, pp. 1014-1020.

Daneshi, H. e Daneshi, A. (2008), “Price Forecasting in Deregulated Electricity Markets – A Bibliographical Survey”, *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*, pp. 657-661.

Deng, S. (1988), “Stochastic Models of Energy Commodity Prices and Their Application: Mean-Reversion with Jumps and Spikes”, *PSERC report* 98-28.

Deng, S. (2000), “Pricing Electricity Derivates under Alternative Stochastic Spot Price Models”, *33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, Vol. 4.

EDP (2012), “História da Marca”, [www.edp.pt/pt/aedp/sobreaedp/marcaEDP/Pages/HistoriaMarca.aspx](http://www.edp.pt/pt/aedp/sobreaedp/marcaEDP/Pages/HistoriaMarca.aspx), último acesso a 13 de Julho de 2012.

## Referências Bibliográficas

- ERSE (2004), “Desenvolvimento do Sistema Eléctrico não Vinculado”.
- ERSE (2011), “Estrutura Tarifária do Setor Eléctrico em 2012”.
- ERSE (2012), “Mercado a Prazo”, [www.erse.pt/pt/supervisãodemercados/mercadodeelectricidade/mercadoaprazo/Paginas/default.aspx?master=ErsePrint.master](http://www.erse.pt/pt/supervisãodemercados/mercadodeelectricidade/mercadoaprazo/Paginas/default.aspx?master=ErsePrint.master), último acesso a 13 de Julho de 2012.
- Europeia, C. (2003), “Directiva 2003/54/CE”.
- Europeia, C. (2007), “Brussels European Council 8/9 March 2007 Presidency Conclusions”.
- Europeia, C. (2009), “Directiva 2009/73/CE”.
- Etheir, R. e Mount, T. (1988), “Estimating the Volatility of Spot Prices in Restructured Electricity Markets and the Implications for Option Values”.
- Gao, F., Guan, X., Cao, X., e Papalexopoulos, A. (2000), “Forecasting Power Market Clearing Price and Quantity Using a Neural Network Method”, *Proceedings of Power Engineering Summer Meeting, Seattle, WA*, pp. 2183-2188.
- Garcia, R.C., Contreras, J., Akkeren, M.V., e Garcia, J.B.C. (2005), “A GARCH Forecasting Model to Predict Day-Ahead Electricity Prices”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 867-874.
- Hong, Y.-Y e Hsiao, C.-Y. (2002), “Locational Marginal Price Forecasting in Deregulated Electric Markets Using Artificial Intelligence”, *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 149, No. 5.
- Koreneff, G., Seppala, A., Lethtonen, M., Kekkonen, V., Laitinen, E., Hakli, J., e Antila, E. (1998), “Electricity Spot Price Forecasting as a Part of Energy Management in De-regulated Power market”, *Proceedings of EMPD*, Vol. 1, pp. 223-228.
- Lagarto, J., Sousa, J. e Martins, A. (2010), “The Impact of The Iberian Electricity Market on the Competitive Behavior of Generating Companies using a Conjectural Variations Approach”, *7th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, pp. 1-9.

- Lagarto, J., Sousa, J., Martins, A. e Ferrão, P. (2012), “Price forecasting in the day-ahead Iberian electricity market using a conjectural variations ARIMA model”, *9th International Conference on the European Energy Market (EEM)*.
- Li, G., Chen, L., Lawarree, J., Gallanti M. e Venturini A. (2006), “State - of - the - Art of Electricity Price Forecasting”, *CIGRE/IEEE PES, 2005. International Symposium*, pp. 110-119.
- Magalhães, M. (1993), “A metodologia de Box-Jenkins para Análise e Previsão de Sucessões Cronológicas”, Giesta, ISCTE.
- Martins, A.M. (2009), “Mercado Ibérico de Electricidade Simulação de um Modelo em Concorrência Perfeita”, *Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do programa do curso de Mestrado em Análise de Dados e Sistemas de Apoio à Decisão*, Universidade do Porto, Faculdade de Economia.
- Mazengia, D.H. e Tuan, L.A. (2008), “Forecasting Spot Electricity Market Prices Using Time Series Models”, *Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on*, pp. 1256-1261.
- Ni, E. e. Luh, P.B. (2001), “Forecasting Power Market Clearing Price and its Discrete PDF Using a Bayesian-based Classification Method”, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 3, pp. 1518-1523, Columbus, OH.
- Nicolaisen, J.D., Richter, Jr.C.W., e Sheblé, G.B. (2000), “Price Signal Analysis for Competitive Electric Generation Companies”, *Proceedings of the Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000*, City University, London, U.K., 4-7, pp. 66-71.
- Nogales, F.J., Contreras, J., Conejo, A.J., e Espinola, R. (2002), “Forecasting Next-Day Electricity Prices by Time Series Models”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, No. 2, pp. 342-348.
- OMIE (2012), “Mercado Intradiário”, [www.omie.es/pt/principal/mercados-e-productos/mercado-daelectricidade/diario-e-intradiario/mercado-intradiario](http://www.omie.es/pt/principal/mercados-e-productos/mercado-daelectricidade/diario-e-intradiario/mercado-intradiario), último acesso a 13 de Julho de 2012.
- Peña, D., Tiao, C.G. e Tsay, S.R. (2001), “A course in Time Series Analysis, Wiley-Interscience”.

## *Referências Bibliográficas*

República, D. (2011), “Decreto-Lei nº 77/2011”, Diário da República, *1ª Série-N.º117-20 de Junho de 2011*.

Rodriguez, C.P. e Anders, G.J. (2004), “Energy Price Forecasting in the Ontario Competitive Power System Market”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 1, pp. 366 – 374.

Sousa, J. (2005), “Integração de mercados liberalizados de energia eléctrica com aplicações ao MIBEL”, *Dissertação de Doutoramento*, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Economia.

Stevenson, M. (2001), “Filtering and Forecasting Spot Electricity Prices in the Increasingly Deregulated Australian Electricity Market”, *International Institute of Forecasters Conference*.

Szkuta, B.R., Sanavria, L.A. e Dillon, T.S. (1999), “Electricity Price Short-Term Forecasting Using Artificial Neural Networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 851-857.

Tomé, B. (2009), “Previsão de Preços de Energia Eléctrica em Mercados de Electricidade – Horizonte de 24 horas”, *Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major de Energia*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Twomey, P., Green, R., Neuhoff, K. e Newberry, D. (2004), “A Review of the Monitoring Market Power”, *Cambridge Working Papers in Economics CWPE 0504, CMI Working Paper 71*.

Valenzuela, J. e Mazumdar, M. (2001), “On the Computation of the Probability Distribution of the Spot Market Price in a Deregulated Electricity Market”, *Proceedings of the 21<sup>st</sup> Power Industry Computer Applications International Conference*, Sydney, Australia, pp. 268-271.

Wang, A.J. e Ramsay, B. (1998), “A Neural Network Based Estimator for Electricity Spot-Pricing with Particular Reference to Weekends and Public Holidays”, *Neurocomputing*, Vol. 23, pp. 47-57.

Yaffee, A.R. e McGee, M. (2000), “Introduction to Time Series Analysis and Forecasting with Applications of SAS and SPSS”, Academic Press.

## *Referências Bibliográficas*

A imagem presente na capa foi retirada a 11 de Outubro de 2011 em <http://www.blogsergiofreire.wordpress.com/2010/01/25/finicio-de-moares/>.



# **Anexos**



## Anexos

### Anexo 1 – Resultados obtidos para 30 Janelas Temporais

**Tabela A.1-** Resultados obtidos pela estimação de 30 janelas temporais para o ano de 2011.

Período utilizado para estimação dos modelos	Dados a prever	Número de dias úteis da sucessão cronológica associada ao modelo seleccionado	R <sup>2</sup>	BIC	Designação do modelo obtido
15 de Janeiro a 9 de Março	10 de Março a 16 de Março	25	0,984	-11,104	ARIMA(1,0,3)(1,1,1)
1 de Fevereiro a 16 e Março	17 de Março a 23 de Março	5	0,994	-11,354	ARIMA(1,1,0)(0,1,0)
8 de Fevereiro a 23 de Março	24 de Março a 30 de Março	30	0,994	-11,052	ARIMA(3,0,0)(1,1,1)
15 de Fevereiro a 30 de Março	31 de Março a 6 de Abril	30	0,989	-10,487	ARIMA(1,0,2)(1,1,1)
22 de Fevereiro a 6 de Abril	7 de Abril a 13 de Abril	15	0,991	-10,249	ARIMA(3,0,0)(0,1,1)
2 de Março a 13 de Abril	14 de Abril a 20 de Abril	20	0,997	-10,141	ARIMA(1,0,0)(0,1,1)
10 de Março a 20 de Abril	26 de Abril a 2 de Maio	5	0,972	-11,152	ARIMA(0,1,0)(1,1,0)
17 de Março a 2 de Maio	3 de Maio a 9 de Maio	5	0,984	-11,392	ARIMA(0,0,1)(0,1,0)
24 de Março a 9 de Maio	10 de Maio a 16 de Maio	5	0,988	-12,573	ARIMA(2,0,0)(0,0,0)

**Tabela A.1 (cont.)** - Resultados obtidos pela estimação de 30 janelas temporais para o ano de 2011.

<b>Período utilizado para estimação dos modelos</b>	<b>Dados a prever</b>	<b>Número de dias úteis da sucessão cronológica associada ao modelo seleccionado</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>BIC</b>	<b>Designação do modelo obtido</b>
31 de Março a 16 de Maio	17 de Maio a 23 de Maio	5	0,998	-11,406	ARIMA(0,1,3)(1,1,0)
7 de Abril a 23 de Maio	24 de Maio a 30 de Maio	5	0,995	-13,128	ARIMA(0,1,0)(0,1,0)
14 de Abril a 30 de Maio	1 de Junho a 8 de Junho	10	0,980	-11,807	ARIMA(1,1,2)(0,1,1)
26 de Abril a 8 de Junho	14 de Junho a 20 de Junho	25	0,988	-11,121	ARIMA(2,0,0)(0,1,1)
3 de Maio a 30 de Junho	21 de Junho a 30 de Junho	5	0,880	-11,453	ARIMA(0,0,2)(1,1,0)
10 de Maio a 30 de Junho	1 de Julho a 7 de Julho	10	0,991	-11,584	ARIMA(2,0,0)(0,0,0)
17 de Maio a 7 de Julho	8 de Julho a 14 de Julho	5	0,981	-12,279	ARIMA(0,0,1)(0,1,0)
24 de Maio a 14 de Julho	15 de Julho a 21 de Julho	10	0,992	-12,352	ARIMA(1,0,0)(0,1,1)
1 de Junho a 21 de Julho	22 de Julho a 29 de Julho	20	0,992	-11,528	ARIMA(2,0,0)(0,0,0)
14 de Junho a 29 de Julho	1 de Agosto a 5 de Agosto	25	0,991	-11,339	ARIMA(1,0,1)(1,0,0)
21 de Junho a 5 de Agosto	8 de Agosto a 12 de Agosto	5	0,984	-12,860	ARIMA(1,0,0)(1,0,0)

**Tabela A.1 (cont.)** - Resultados obtidos pela estimação de 30 janelas temporais para o ano de 2011.

<b>Período utilizado para estimação dos modelos</b>	<b>Dados a prever</b>	<b>Número de dias úteis da sucessão cronológica associada ao modelo seleccionado</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>BIC</b>	<b>Designação do modelo obtido</b>
1 de Julho a 12 de Agosto	16 de Agosto a 22 de Agosto	10	0,997	-12,094	ARIMA(1,0,0)(1,0,0)
8 de Julho a 22 de Agosto	23 de Agosto a 29 de Agosto	10	0,988	-11,134	ARIMA(1,0,1)(1,1,0)
15 de Julho a 29 de Agosto	30 de Agosto a 5 de Setembro	5	0,806	-11,956	ARIMA(1,0,0)(1,1,0)
22 de Julho a 5 de Setembro	6 de Setembro a 13 de Setembro	5	0,986	-11,610	ARIMA(0,0,3)(1,0,0)
1 de Agosto a 13 de Setembro	14 de Setembro a 20 de Setembro	15	0,966	-11,440	ARIMA(1,0,0)(0,1,1)
8 de Agosto a 20 de Setembro	21 de Setembro a 27 de Setembro	20	0,985	-11,481	ARIMA(2,0,0)(1,0,0)
16 de Agosto a 27 de Setembro	28 de Setembro a 4 de Outubro	5	0,981	-12,720	ARIMA(0,1,0)(1,0,0)
23 de Agosto a 4 de Outubro	6 de Outubro a 12 de Outubro	10	0,958	-12,061	ARIMA(0,1,0)(1,0,0)
30 de Agosto a 12 de Outubro	13 de Outubro a 19 de Outubro	15	0,948	-11,681	ARIMA(0,1,0)(1,0,1)
6 de Setembro a 19 de Outubro	20 de Outubro a 26 de Outubro	30	0,982	-11,416	ARIMA(2,0,0)(1,1,1)

**Tabela A.2-** Resultados obtidos para a previsão de 1 e 5 dias úteis em 30 janelas temporais para o ano de 2011.

Período utilizado para estimação dos modelos	Dados a prever	Número de dias úteis da sucessão cronológica associada ao modelo seleccionado	Erro ( $ e_t $ ) para 1 dia		Erro ( $ e_t $ ) para 5 dias		Designação do modelo obtido
			$\bar{E}$	$S'_e$	$\bar{E}$	$S'_e$	
15 de Janeiro a 9 de Março	10 de Março a 16 de Março	25	0,00740	0,00929	0,01142	0,02297	ARIMA(1,0,3)(1,1,1)
1 de Fevereiro a 16 de Março	17 de Março a 23 de Março	5	0,05493	0,10068	0,02678	0,04703	ARIMA(1,1,0)(0,1,0)
8 de Fevereiro a 23 de Março	24 de Março a 30 de Março	30	0,02798	0,04510	0,01494	0,02912	ARIMA(3,0,0)(1,1,1)
15 de Fevereiro a 30 de Março	31 de Março a 6 de Abril	30	0,01615	0,00746	0,01586	0,01150	ARIMA(1,0,2)(1,1,1)
22 de Fevereiro a 6 de Abril	7 de Abril a 13 de Abril	15	0,00664	0,00781	0,03436	0,11992	ARIMA(3,0,0)(0,1,1)
2 de Março a 13 de Abril	14 de Abril a 20 de Abril	20	0,00711	0,00930	0,00862	0,01060	ARIMA(1,0,0)(0,1,1)
10 de Março a 20 de Abril	26 de Abril a 2 de Maio	5	0,01466	0,01996	0,11787	0,01166	ARIMA(0,1,0)(1,1,0)
17 de Março a 2 de Maio	3 de Maio a 9 de Maio	5	0,00552	0,00467	0,00908	0,01324	ARIMA(0,0,1)(0,1,0)
24 de Março a 9 de Maio	10 de Maio a 16 de Maio	5	0,01422	0,01430	0,02236	0,03935	ARIMA(2,0,0)(0,0,0)
31 de Março a 16 de Maio	17 de Maio a 23 de Maio	5	0,01044	0,01273	0,01469	0,00785	ARIMA(0,1,3)(1,1,0)

**Tabela A.2 (cont.)** - Resultados obtidos para a previsão de 1 e 5 dias úteis em 30 janelas temporais para o ano de 2011.

Período utilizado para estimação dos modelos	Dados a prever	Número de dias úteis da sucessão cronológica associada ao modelo seleccionado	Erro ( $ e_t $ ) para 1 dia		Erro ( $ e_t $ ) para 5 dias		Designação do modelo obtido
			$\bar{E}$	$S'_e$	$\bar{E}$	$S'_e$	
7 de Abril a 23 de Maio	24 de Maio a 30 de Maio	5	0,00819	0,00975	0,00591	0,00948	ARIMA(0,1,0)(0,1,0)
14 de Abril a 30 de Maio	1 de Junho a 8 de Junho	10	0,02844	0,03926	0,04123	0,02907	ARIMA(1,1,2)(0,1,1)
26 de Abril a 8 de Junho	14 de Junho a 20 de Junho	25	0,00712	0,00954	0,00899	0,01273	ARIMA(2,0,0)(0,1,1)
3 de Maio a 30 de Junho	21 de Junho a 30 de Junho	5	0,00458	0,00792	0,01120	0,2594	ARIMA(0,0,2)(1,1,0)
10 de Maio a 30 de Junho	1 de Julho a 7 de Julho	10	,00752	0,00959	0,00851	0,00830	ARIMA(2,0,0)(0,0,0)
17 de Maio a 7 de Julho	8 de Julho a 14 de Julho	5	0,00394	0,00455	0,00493	0,00590	ARIMA(0,0,1)(0,1,0)
24 de Maio a 14 de Julho	15 de Julho a 21 de Julho	10	0,00759	0,00673	0,01080	0,01289	ARIMA(1,0,0)(0,1,1)
1 de Junho a 21 de Julho	22 de Julho a 29 de Julho	20	0,01575	0,02053	0,01505	0,01941	ARIMA(2,0,0)(0,0,0)
14 de Junho a 29 de Julho	1 de Agosto a 5 de Agosto	25	0,00678	0,01157	0,00807	0,00892	ARIMA(1,0,1)(1,0,0)
21 de Junho a 5 de Agosto	8 de Agosto a 12 de Agosto	5	0,01564	0,01936	0,01579	0,02482	ARIMA(1,0,0)(1,0,0)

**Tabela A.2 (cont.)** - Resultados obtidos para a previsão de 1 e 5 dias úteis em 30 janelas temporais para o ano de 2011.

Período utilizado para estimação dos modelos	Dados a prever	Número de dias úteis da sucessão cronológica associada ao modelo seleccionado	Erro ( $ e_t $ ) para 1 dia		Erro ( $ e_t $ ) para 5 dias		Designação do modelo obtido
			$\bar{E}$	$S'_e$	$\bar{E}$	$S'_e$	
1 de Julho a 12 de Agosto	16 de Agosto a 22 de Agosto	10	0,00332	0,00522	0,00668	0,00991	ARIMA(1,0,0)(1,0,0)
8 de Julho a 22 de Agosto	23 de Agosto a 29 de Agosto	10	0,00838	0,01064	0,00929	0,00872	ARIMA(1,0,1)(1,1,0)
15 de Julho a 29 de Agosto	30 de Agosto a 5 de Setembro	5	0,00270	0,00248	0,00701	0,01232	ARIMA(1,0,0)(1,1,0)
22 de Julho a 5 de Setembro	6 de Setembro a 13 de Setembro	5	0,00789	0,01255	0,00878	0,01311	ARIMA(0,0,3)(1,0,0)
1 de Agosto a 13 de Setembro	14 de Setembro a 20 de Setembro	15	0,01157	0,01629	0,01198	0,02223	ARIMA(1,0,0)(0,1,1)
8 de Agosto a 20 de Setembro	21 de Setembro a 27 de Setembro	20	0,00390	0,00238	0,01115	0,00681	ARIMA(2,0,0)(1,0,0)
16 de Agosto a 27 de Setembro	28 de Setembro a 4 de Outubro	5	0,00964	0,00332	0,001508	0,00792	ARIMA(0,1,0)(1,0,0)
23 de Agosto a 4 de Outubro	6 de Outubro a 12 de Outubro	10	0,00860	0,00275	0,01960	0,01253	ARIMA(0,1,0)(1,0,0)
30 de Agosto a 12 de Outubro	13 de Outubro a 19 de Outubro	15	0,00928	0,01498	0,00658	0,00887	ARIMA(0,1,0)(1,0,1)
6 de Setembro a 19 de Outubro	20 de Outubro a 26 de Outubro	30	0,00473	0,00711	0,01559	0,04020	ARIMA(2,0,0)(1,1,1)

## Anexo 2 – Estatísticas de Teste e Resultados

### Teste Shapiro-Wilk

- **Estatística de teste:**

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^k a_i X_i)}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{A.1})$$

Onde:

W – estatística de teste de Shapiro-Wilk;

$a_i$  – constantes geradas a partir da média, variância e covariância de k ordens com distribuição Normal N(0,1), tratando-se de valores tabelados;

k – dimensão da amostra;

$X_i$  – valores ordenados da variável X por ordem crescente;

$\bar{X}$  – estimador média da variável X.

- **Resultados:**

**Tabela A.3-** Resultados obtidos pelo teste de Shapiro-Wilk para 1 dia útil.

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Diferença_1 D	,114	28	,200*	,981	28	,869

a. Lilliefors Significance Correction

\*. This is a lower bound of the true significance.

**Tabela A.4-** Resultados obtidos pelo teste de Shapiro-Wilk para 5 dias úteis.

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Diferença_5 D	,207	26	,006	,895	26	,012

a. Lilliefors Significance Correction

## Teste *t-student*

- **Estatística de teste:**

$$\frac{\bar{D} - \mu_D}{S'_D / \sqrt{n}} \cap t_{(n-1)} \quad (\text{A.2})$$

Em que:

$n$  – número de pares de observações;

$\bar{D}$  – estimador referente à diferença das amostras;

$\mu_D$  – valor médio da diferença das amostras;

$S'_D$  – estimador variância da diferença das amostras.

- **Resultados:**

**Tabela A.5-** Resultados obtidos pelo teste de *t-student* para 1 dia útil.

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	Med_Err_Dir_1D - Med_Err_Ind_1D	-,5124121	1,7368878	,3171109	-1,1609767	,1361524	-1,616	29	,117

**Tabela A.6-** Resultados obtidos pelo teste de *t-student* para 5 dias úteis.

		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	Med_Err_Dir_5D - Med_Err_Ind_5D	-,7037541	3,4172592	,6239033	-1,9797796	,5722715	-1,128	29	,269

## Teste Wilcoxon

- **Estatística de teste:**

$$Z = \frac{\min(S^+, S^-) - (m(m+1)/4)}{\sqrt{m(m+1)(2m+1)/24 - \sum_{j=1}^l (t_j^3 - t_j)/48}} \quad (\text{A.3})$$

Onde:

Z – estatística de teste de Wilcoxon;

m – número de casos com diferenças não nulas;

l – número de casos ligados;

$t_j$  – número de casos referentes à ligação j,  $j = 1, \dots, l$ ;

$S^+$  – soma das diferenças positivas;

$S^-$  – soma das diferenças negativas.

- **Resultados:**

**Tabela A.7-** Resultados obtidos pelo teste de Wilcoxon para 1 dia útil.

<b>Test Statistics<sup>b</sup></b>	
	Med_Err_In d_1D - Med_Err_Di r_1D
Z	-1,820 <sup>a</sup>
Asymp. Sig. (2-tailed)	,069

a. Based on negative ranks.

b. Wilcoxon Signed Ranks Test

**Tabela A.8-** Resultados obtidos pelo teste de Wilcoxon para 5 dias úteis.

<b>Test Statistics<sup>b</sup></b>	
	Med_Err_In d_5D - Med_Err_Di r_5D
Z	-1,594 <sup>a</sup>
Asymp. Sig. (2-tailed)	,111

a. Based on negative ranks.

b. Wilcoxon Signed Ranks Test