

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Previsão de Preços de Energia Eléctrica em
Mercados de Electricidade - Horizonte de 24
Horas**

Bruno Tiago Soares Ribeiro Tomé

VERSÃO PROVISÓRIA

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major de Energia

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Tomé Saraiva
Co-orientador: Prof. Dr. José Nuno Moura Marques Fidalgo

Junho de 2009

Resumo

A reestruturação do sector eléctrico a nível mundial apresenta um conjunto de desafios para as entidades que nele actuam.

O presente estudo aborda esta problemática, em especial os desafios impostos pela União Europeia aos seus Estados-Membros, através da análise das Directivas Europeias que foram criadas de modo a desenvolver e regular os mercados de energia.

A previsão do preço de energia eléctrica em mercados de electricidade num horizonte temporal de 24 horas, foi o objectivo deste trabalho.

Para tal foi analisado o Mercado Ibérico de Electricidade, contemplando o impacto e a adaptação legislativa de forma a viabilizar a sua implementação. Neste contexto, foi dado especial destaque à capacidade de transporte das linhas de interligação entre os dois países e às suas implicações.

Foi abordada ainda a informação sobre técnicas de previsão utilizadas na estimação do preço de energia eléctrica em mercados de electricidade, tendo sido escolhida a metodologia de Redes Neurais Artificiais.

A informação sobre estruturas, arquitecturas e modelos das ANN a aplicar, foram também alvo de análise.

De salientar a importância do tratamento de dados e da escolha das variáveis de entrada, de modo a potencializar o desempenho da Rede Neuronal Artificial.

Para finalizar apresentam-se os resultados demonstrativos da performance da ANN escolhida nesta previsão.

Abstract

The restructure of the global electricity sector presents a number of challenges for organizations that operate in this area.

This study refers this issue, in particular the challenges that European Union obliged to its Member-States through the analysis of European Directives, which were created to develop and regulate the energy markets.

The objective of this work was the forecasting of the electricity's price in the energy markets for a period time of 24 hours.

To achieve this goal it was considered the Iberian Electricity Market, including the impact and adaptation of legislation to enable its implementation. In this context, particular emphasis was given to the transport capacity of the lines of interconnection between the two countries and their implications.

This document has information about the forecasting models used to predict the price of electricity in the energy markets. The Artificial Neural Networks was the method adopted.

Structure, models and architectures to implement the ANN, were also under review.

The importance of processing and the choice of input variables have been enhanced in order to maximize the performance of the Artificial Neural Network.

Finally this dissertation shows the results, demonstrating the performance of ANN chosen in this forecast.

Agradecimentos

Os meus mais sinceros agradecimentos ao Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva pelo apoio prestado na orientação deste meu trabalho, assim como pelos preciosos conhecimentos facultados no âmbito dos mercados de electricidade.

Ao Professor Doutor José Nuno Fidalgo expresso também a minha gratidão pela forma como co-orientou este meu trabalho, e pela partilha do seu conhecimento no universo de Redes Neurais.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xi
Abreviaturas e símbolos	xii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Apresentação do Trabalho.....	1
1.2 Estrutura.....	2
Capítulo 2	3
Sector Eléctrico.....	3
2.1 Reestruturação do Sector Eléctrico.....	3
2.2 Evolução em Portugal.....	7
2.3 Evolução em Espanha.....	8
Capítulo 3	11
Mercados de Energia Eléctrica.....	11
3.1 Mercado Ibérico de Electricidade.....	12
Capítulo 4	23
Metodologias de Previsão.....	23
4.1 Evolução das Metodologias de Previsão.....	23
4.2 Redes Neurais Artificiais.....	25
Capítulo 5	33
Dados dos Conjuntos de Treino e Teste.....	33
5.1 Entradas.....	34

5.2 Alvos.....	34
5.3 Saídas.....	34
5.4 Variáveis.....	35
5.5 Estandarização dos Dados.....	39
Capítulo 6.....	41
Previsão de Preços de Energia Eléctrica no Mercado Ibérico de Energia.....	41
6.1 ANN Treinadas.....	42
6.2 Tratamento de Feriados.....	45
6.3 Resultados.....	47
Capítulo 7.....	57
Conclusão e Trabalho Futuro.....	57
Referências.....	59

Lista de figuras

Figura 3.1 - Curvas de Oferta e Procura num mercado spot.....	15
Figura 3.2 - Desempenho da capacidade de interligação do MIBEL em 2008.....	18
Figura 4.1 - Representação simplificada de um neurónio biológico.....	26
Figura 4.2 - Representação de uma unidade de processamento (neurónio artificial)	27
Figura 4.3 - Arquitectura simplificada da ANN com o melhor desempenho.....	29
Figura 4.4 - Imagem retirada da ferramenta <i>nnftool</i> do software <i>MATLAB</i> , relativa ao processo de treino da ANN.....	31
Figura 6.1 - Evolução dos erros no conjunto de treino, validação e teste no tempo.....	44
Figura 6.2 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para segunda-feira, dia 16 de Março de 2009.....	48
Figura 6.3 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para quarta-feira, dia 12 de Abril de 2009.....	48
Figura 6.4 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para quarta-feira, dia 18 de Março de 2009.....	49
Figura 6.5 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para quinta-feira, dia 5 de Março de 2009.....	49
Figura 6.6 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para sexta-feira, dia 17 Abril de 2009.....	50
Figura 6.7 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para sábado, dia 25 Abril de 2009.....	51
Figura 6.8 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para domingo, dia 19 Abril de 2009.....	51
Figura 6.9 - Preço de Energia eléctrica real, respectiva previsão e previsão após o tratamento de feriados para sexta-feira, dia 10 de Abril de 2009.....	52
Figura 6.10 - Variação do Preço de Energia Eléctrica real e respectiva previsão para o mês de Março de 2009.....	54

Lista de tabelas

Tabela 5.1 - Valores da variável Feriados.....	37
Tabela 6.1 - Nomenclatura das ANN e respectivas variáveis associadas.....	42
Tabela 6.2 - Comparação entre diferentes ANN, usando o MSE.....	43
Tabela 6.3 - Valores médios do <i>MAPE</i> por dia durante os meses de Março e Abril de 2009..	53
Tabela 6.4 - Valores médios do <i>MAPE</i> por hora.....	55

Abreviaturas e Símbolos

ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
ARIMA	<i>Auto Regressive Integrated Moving Average</i>
CAE	Contratos de Aquisição de Energia
CE	Comunidade Europeia
CEE	Comunidade Económica Europeia
CMEC	Custos de Manutenção do Equilíbrio Contratual
CNE	<i>Comisión Nacional de Energia</i>
DS	Dia da Semana
EDP	Electricidade de Portugal / Energias de Portugal
ERGEG	<i>European Regulators' Group of Electricity and Gas</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
MIBEL	Mercado Ibérico de Electricidade
MSE	<i>Mean Square Error</i>
OMEL	<i>Operadora del Mercado Espanhol de Electricidad</i>
OMIE	Operador do Mercado Ibérico de Energia - Polo Espanhol
OMIP	Operador do Mercado Ibérico de Energia - Polo Português
PB	Preço do <i>Brent</i>
PEE	Preço de Energia Eléctrica
REE	<i>Red Eléctrica de Espanha</i>
REN	Redes Energéticas Nacionais
SEE	Sistema Eléctrico de Energia
UE	União Europeia

Lista de símbolos

p_m	Preço de Mercado
q_m	Quantidade de Mercado
w_n	Pesos das ligações
x_n	Entradas
y	Saídas
a_k	Valor Real do Preço de Energia Eléctrica
y_k	Previsão do Preço de Energia Eléctrica
N	Número de Previsões
Δ_{dia}	Varição relativa do Preço de Energia Eléctrica correspondente ao dia
$\Delta_{feriado}$	Varição relativa do Preço de Energia Eléctrica correspondente ao feriado
$\Delta_{semanal}$	Varição relativa semanal do Preço de Energia Eléctrica
ε	Erro

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento e Apresentação do Trabalho

A evolução da civilização origina mudanças nas diversas áreas da economia mundial. Em particular, o sector eléctrico tem vivido décadas de grandes mudanças.

Este sector, durante largos anos do século passado, foi propriedade do estado ou de empresas monopolistas. Porém, esta visão foi sendo alterada, pensando-se agora que um mercado livre e competitivo se adequa melhor às necessidades da sociedade, onde a energia tem um papel fundamental.

Esta mudança de paradigma originou um processo de reestruturação complexo do sector eléctrico, que levou à sua desverticalização e ao aparecimento dos mercados de electricidade [1, 2].

As empresas outrora estatais ou actuando em termos de monopólio foram, assim, obrigadas a desverticalizar, ou seja, existiu a necessidade de separar as varias actividades do sector energético, como a produção, o transporte, a distribuição e a comercialização, de modo a melhor alocar os seus custos, a verificar quais as áreas onde é necessário fazer melhoramentos e a criar competição em algumas delas.

O verdadeiro impacto das medidas tomadas para revitalizar o sector e promover a concorrência, será visível no decorrer das próximas décadas.

A relevância das políticas “verdes” ou “amigas do ambiente” é também um factor de grandes mudanças no contexto global do sector, promovendo novas filosofias e pensamentos sobre a forma como, as nações mais desenvolvidas, estão a usar os recursos naturais do planeta.

O sector de energia é, neste momento, um dos principais focos da investigação e desenvolvimento, procurando desenvolver novas formas renováveis de produzir energia, ou melhorar o desempenho das tecnologias já existentes.

A criação de mercados de electricidade em forma de bolsa trouxe ao sector novas características. À semelhança de outros bens transaccionados em bolsas, a previsão do preço de electricidade tornou-se fundamental de modo a prever o funcionamento do mercado a longo prazo e de forma a maximizar os proveitos no curto e muito curto prazo.

Deste modo, este estudo propõe analisar o funcionamento do recém-criado Mercado Ibérico de Electricidade introduzindo uma metodologia de previsão do preço de energia eléctrica para um horizonte de 24 horas.

1.2 - Estrutura do texto

Este trabalho encontra-se estruturado em 7 Capítulos, abordando o Capítulo inicial o enquadramento e apresentação do trabalho.

No Capítulo 2 é efectuada uma análise às alterações estruturais no sector eléctrico nas últimas décadas. O estudo da reestruturação do sector aborda o panorama global, sendo centrado na União Europeia e especialmente na Península Ibérica.

No Capítulo 3 aborda-se o conceito de Mercados de Energia Eléctrica, sendo o estudo focalizado no Mercado Ibérico de Energia apresentando-se informações sobre o seu funcionamento.

No Capítulo 4 é apresentada a evolução das metodologias de previsão que são utilizadas na área da previsão. Nesta secção é importante realçar a escolha da metodologia a aplicar, as Redes Neurais Artificiais, e a sua justificação.

Ainda no Capítulo 4, é feito um estudo acerca das ANN abordando os fundamentos que estiveram ligados ao aparecimento desta metodologia, assim como as características que é necessário ter em consideração quando se adopta este método. Neste contexto é abordada informação sobre a estrutura, arquitectura e software a utilizar.

O Capítulo 5 é centrado na apresentação dos dados que foram utilizados na realização deste trabalho. É referido o período temporal em análise por este estudo, assim como as diferentes variáveis utilizadas na previsão de Preços de Energia Eléctrica.

No Capítulo 6 aborda-se os resultados obtidos na realização deste estudo, sendo para tal, necessário estabelecer previamente o método aplicado na escolha da arquitectura da ANN utilizada nesta previsão.

Por fim, no Capítulo 7 é efectuada uma síntese e conclusão deste estudo e apontado o caminho para um possível trabalho de futuro.

Capítulo 2

Sector Eléctrico

2.1 - Reestruturação do Sector Eléctrico

2.1.1 - Processo de Reestruturação

As últimas décadas do século XX foram de grandes mudanças no paradigma do sector eléctrico mundial, despoletadas por factores de diversos tipos tais como aspectos económicos, demográficos e ambientais e estratégicos.

O Chile foi pioneiro no que diz respeito à reestruturação do sector eléctrico. No ano de 1978, criou uma agência, a *Comisión Nacional de Energia*, que visava o despoletar de novas políticas energéticas, de modo a promover investimentos de capitais privados no sector, que originassem competição no sector eléctrico [3].

Depois da experiência do Chile, outros países seguiram o seu exemplo, alguns anos mais tarde. Na Europa, o processo iniciou-se no Reino Unido, com a reestruturação ocorrida em Inglaterra e Gales, em 1990. Ainda durante a década de (19)90, países como a Argentina, a Austrália, a Nova Zelândia e os Estados Unidos da América realizaram importantes reestruturações no seu sector eléctrico [4].

A reestruturação na Europa seguiu-se pela constituição do *NordPool*, pela Noruega e Suécia aos quais se juntaram a Finlândia e a Dinamarca, anos mais tarde.

Nos últimos anos do século XX, uma significativa parte dos países da União Europeia, já tinha novas políticas estruturantes do sector, ou encontrava-se em fase de implementação das mesmas. Estas alterações foram alicerçadas em dois níveis: por um lado, sob Directivas Europeias relativas ao Mercado de Electricidade, onde os Estados-Membros seriam obrigados a adoptar medidas de encontro à liberalização dos seus mercados; por outro, a Comissão Europeia promoveu esforços de modo a melhorar as ligações entre os sistemas eléctricos de

cada Estado. Estas alterações visaram melhorar a legislação de cada mercado nacional, assim como reforçar as linhas de transmissão entre os vários países [5].

Estas medidas foram sendo tomadas, tendo em vista o objectivo final de constituir um mercado Europeu.

Da experiência internacional de liberalização, não é possível obter um consenso universal sobre o modelo mais adequado para a estrutura do sector. Porém, é possível encontrar um consenso sobre algumas medidas gerais indispensáveis para um bom funcionamento do mercado.

Assim, a liberalização do mercado de electricidade deve passar pelas seguintes etapas:

- Introdução da concorrência na produção e na comercialização;
- Regulação por incentivos nas redes de transmissão e distribuição;
- Criação de um regulador independente;
- Privatização das empresas do sector.

2.1.2 - Directivas Europeias

Com o objectivo de proceder a alterações no panorama Europeu do sector de energia eléctrica, a UE desenvolveu, nas últimas décadas, vários actos legislativos denominados Directivas Europeias.

A Directiva é um acto legislativo da União Europeia onde se exige determinado resultado aos seus Estados-Membros sem, no entanto, especificar a alteração legal a introduzir. Então, cada Estado-Membro possui uma certa flexibilidade quanto às leis a adoptar, de modo a obter melhores resultados.

A primeira fase da organização do mercado interno do sector eléctrico Europeu deu-se em 1990, com a publicação da Directiva 90/547/CEE, de 29 de Outubro, que se referia ao trânsito de electricidade nas grandes redes, e da Directiva 90/377/CEE, de 29 de Junho, referente ao estabelecimento de um processo comunitário que assegurasse a transparência dos preços pago pelo consumidor final industrial de gás e electricidade.

Anos mais tarde, ocorreu a publicação da Directiva 96/92/CE, de 19 de Dezembro onde se estabeleceram regras comuns para o mercado de electricidade, que visaram três importantes aspectos da liberalização [4, 6]:

- A concorrência na produção;
- O acesso de terceiros às redes de transporte;
- A separação contabilística das empresas verticalmente integradas.

No contexto da actividade de produção, a Directiva estabeleceu que, no que diz respeito à implantação de novas unidades de produção, fosse necessária a autorização e adjudicação por concurso. Os seus critérios deveriam ser objectivos, transparentes e não discriminatórios.

Esta Directiva contempla ainda a designação em cada Estado-Membro de um Operador da Rede de Transporte, que está incumbido de explorar, manter e, eventualmente, desenvolver a rede de transporte e as suas interligações com outras redes, com o objectivo final de garantir a segurança e qualidade do abastecimento.

À semelhança da actividade de transporte, surge também na da distribuição a figura de um operador de rede, denominado Operador da Rede de Distribuição. Para a designação deste operador, os Estados-Membros tinham a opção de nomeá-los, ou atribuir essa competência, às empresas proprietárias das redes de distribuição.

Na Directiva ficou ainda contemplada, a possibilidade dos Estados-Membros exigirem que, na escolha das instalações de produção, os operadores dessem prioridade a centrais que utilizassem fontes de energia renováveis ou resíduos ou, ainda, produção combinada de calor e electricidade.

Como foi referido anteriormente, o acesso de terceiros à rede é um aspecto essencial na liberalização do mercado. Assim, esta Directiva previa que os Estados-Membros pudessem optar por um modelo de acesso negociado ou de comprador único.

No modelo de acesso negociado, os produtores, fornecedores e clientes elegíveis, podiam negociar entre si o acesso à rede. Esta negociação era feita através de contratos bilaterais, baseados em preços indicativos, publicados pelo operador de rede, para a respectiva utilização.

No modelo de comprador único, como o próprio nome indica, deveria ser designada uma entidade como comprador único, sendo que, possuía juntamente com o operador da rede de transporte, a capacidade para recusar o acesso à rede.

A Directiva 96/92/CE foi revogada em 26 de Junho de 2003, pela Directiva 2003/54/CE que estabeleceu regras comuns para o mercado interno da electricidade, correspondendo à terceira fase na construção do mercado interno da electricidade [7].

A referida Directiva definiu alterações nas diversas áreas do mercado, das quais se destacam as seguintes:

- Estabelecimento de regras comuns para a produção, transporte, distribuição e fornecimento de energia eléctrica.
- Regras de organização e funcionamento do sector.
- O acesso ao mercado.
- Os critérios e mecanismos aplicáveis aos concursos, no que diz respeito à concessão de autorizações e à exploração das redes.

Na construção de nova capacidade de produção, é exigido aos Estados-Membros a adopção de critérios objectivos, transparentes e não discriminatórios na abertura de concursos. Nesta área, existe ainda a possibilidade de implementação de medidas de eficiência energética e de gestão da procura.

No que diz respeito à exploração das redes de transporte e de distribuição, como foi estabelecido no anterior pacote legislativo de 1996, os operadores de rede são designados pelos Estados-Membros, ou pelas empresas proprietárias das redes. Caso estes façam parte de uma empresa verticalmente integrada, será necessário que tenham independência jurídica da organização e da tomada de decisões das outras actividades não relacionadas com o transporte ou a distribuição, não sendo requerido, no entanto, a separação da propriedade. Existe a possibilidade de um operador combinar a exploração da rede de transporte com a rede de distribuição, sendo, neste caso, exigida a separação de contas para cada uma das suas actividades, como se de empresas distintas se tratasse, de modo a evitar discriminações, subvenções cruzadas e distorções de concorrência.

Uma medida importante correspondeu à obrigatoriedade dos Estados-Membros designarem um ou mais organismos competentes com funções de entidades reguladoras e que devem ser totalmente independentes dos interesses do sector. As suas competências são vastas, incluindo a garantia de não discriminação zelando por uma concorrência efectiva e pelo bom funcionamento do mercado. São ainda responsáveis por fixar ou aprovar metodologias de cálculo ou estabelecer condicionantes de ligação e acesso às redes nacionais.

Ficou ainda estabelecido, que os Estados-Membros, com base no conceito de serviço público, teriam a possibilidade de impor requisitos de qualidade de serviço, segurança do fornecimento e protecção do ambiente.

Os Estados-Membros devem ainda garantir a criação de um sistema de acesso de terceiros às redes de transporte e distribuição para todos os clientes elegíveis e também devem garantir o direito dos clientes de serem abastecidos de energia eléctrica.

Relativamente à abertura dos mercados, os Estados-Membros deverão considerar como elegíveis, todos os clientes não domésticos a partir de 1 de Julho de 2004, sendo esta possibilidade alargada a todos os clientes a partir de 1 de Julho de 2007.

No contexto do comércio transfronteiriço de energia eléctrica, foram estabelecidas as condições de acesso às redes de interligação. Foi, assim, estabelecido um mecanismo de compensação para os fluxos transfronteiriços de electricidade, assim como os princípios a adoptar no que se refere às tarifas para o transporte e à atribuição das capacidades de interligação entre as várias redes de transporte nacionais.

A 11 de Novembro de 2003, foi criado o Grupo Europeu de Reguladores de Electricidade e do Gás (ERGEG), de modo a promover a cooperação entre as entidades reguladoras de cada Estado-Membro.

A CE tem vindo a elaborar análises sobre o mercado interno de electricidade. Os problemas identificados são a insuficiente interligação entre os Estados-Membros, o elevado poder de mercado das empresas produtoras e, também, a assimetria denotada nas diferentes fases de desenvolvimento em que se encontram os mercados de electricidade, nos diversos países.

Em 19 de Setembro de 2007, a CE lançou o Terceiro Pacote Legislativo, que tinha como grande objectivo, garantir uma real e efectiva possibilidade de escolha do fornecedor. Este pacote visava promover também a sustentabilidade, estimulando a eficiência energética e garantindo o acesso de todas as empresas ao mercado de energia [8].

O direito de escolha do fornecedor é uma condição essencial para a existência de mercados concorrenciais. Um mercado competitivo, significará um acréscimo na qualidade de serviço, na segurança do abastecimento de energia eléctrica e origina um clima propenso a investimentos em meios de produção e nas redes de transporte e distribuição. Este investimento promoverá, por sua vez, melhorias das condições técnicas do sector e levará a um melhor desempenho do mesmo.

2.2 - Evolução em Portugal

No caso Português, partiu-se de uma indústria verticalmente integrada e de propriedade pública, pelo que a sua transformação numa indústria de concorrencial e propriedade privada, implicou a adopção de diversas medidas:

- A reestruturação exigiu a desverticalização da produção, transmissão, distribuição e das actividades de comercialização, assim como, a dispersão horizontal da produção e comercialização;
- Introdução da concorrência no mercado, permitindo ainda a entrada de novos agentes quer a nível da produção, quer da oferta;
- A regulação do sector foi entregue a uma entidade reguladora independente. Foi necessário ainda garantir o acesso de terceiros à rede;
- Houve a necessidade de privatizar as empresas públicas já existentes e permitir a entrada de novas empresas privadas no mercado.

A separação efectiva das actividades de produção e transmissão, é um dos pontos críticos para atingir um mercado de electricidade competitivo, já que, assim se evitam comportamentos anti-competitivos por parte das empresas.

Após a revolução ocorrida em Portugal em Abril de 1974, ocorreram alterações de fundo no panorama Nacional. Entre várias nacionalizações ocorridas em diferentes sectores da economia, a 30 de Junho de 1976, como resultado da nacionalização e fusão das principais empresas do sector eléctrico Português, nasceu a EDP - Electricidade de Portugal.

Nesta altura a EDP era uma empresa verticalizada - responsável pelo transporte, distribuição e pela maior parte da produção de energia eléctrica em Portugal - que tinha três desafios fundamentais:

- Electrificação do País;
- Modernização e extensão das redes de Transporte e Distribuição;
- Estabelecimento de um sistema tarifário único para todos os clientes;

No final da década de (19)80, iniciou-se a abertura do sector eléctrico com a publicação do Decreto-Lei nº 189/88, de 27 de Maio, que incentivou a produção independente usando fontes renováveis ou cogeração.

Em 1995 ocorreu uma reforma do sector eléctrico, tendo sido estabelecimento de um novo modelo organizacional, conduzindo-o à privatização e reestruturação (separação das actividades de produção, transporte e distribuição) do Grupo EDP. Também foi criada a Entidade Reguladora do Sector Eléctrico (ERSE).

A ERSE foi criada com as competências de elaboração de diversos regulamentos e fixação de tarifários, sendo independente do poder político e das empresas do sector energético.

No ano 2000 e devido a uma nova fase de privatização do Grupo EDP, deu-se a separação da Rede Eléctrica Nacional - REN - do mesmo, ficando maioritariamente na posse do Estado. A REN é responsável pelo transporte de energia eléctrica e gestão do sistema eléctrico. Em 2007, ocorreu nova reestruturação na REN, denominando-se agora por Redes Energéticas Nacionais, S.A. devido à aglomeração das infra-estruturas relativas ao gás natural.

Em 2006, para a abertura do MIBEL foi necessário proceder ao término dos Contratos de Aquisição de Energia - CAE - em vigor (alguns com duração de largas dezenas de anos). De modo a compensar as empresas de produção, foi criado um mecanismo de compensação denominado de CMEC - Custos de Manutenção do Equilíbrio Contratual, que irá funcionar até 2017. Nesse ano, os produtores Portugueses ficarão a depender unicamente do mercado. Este foi um passo fundamental para o desenvolvimento do MIBEL, na medida em que permite a venda directa em mercado da correspondente energia produzida [9, 10].

Ainda em 2006 teve início a liberalização do mercado de electricidade de baixa tensão, enquanto se procedeu à organização do sector nas actividades de produção (em regime ordinário e especial), de transporte, de distribuição e de comercialização. Foram ainda introduzidos mecanismos competitivos na produção e na comercialização.

Em Julho de 2007, após anos de negociações e de ser por diversas vezes adiado, deu-se o arranque mais efectivo da operação do MIBEL, Mercado Ibérico de Electricidade.

2.3 - Evolução em Espanha

Em 1995, foi aprovada nova legislação que tinha como objectivo promover a reestruturação do sector eléctrico Espanhol.

Este sector apresentava uma estrutura mista, com interesses estatais e privados, e a actividade de transporte e despacho encontrava-se integrada na mesma actividade.

A legislação aprovada continha como tópico fundamental, a separação entre a produção de energia eléctrica e a sua distribuição, promovendo a separação progressiva entre distribuição e comercialização. Em 1995, foi também criada a *Comisión Nacional del Sistema Eléctrico*, uma entidade reguladora do sector.

Porém, a grande reestruturação do sector deu-se no final de 1997, com a publicação da *Ley 54/1997 del Sector Eléctrico*, onde foi legislada a diferenciação entre actividades reguladas e não reguladas e respectiva separação jurídica, assim como foi dado início à criação do mercado de energia eléctrica, promovendo a liberdade de escolha dos consumidores e o acesso livre de terceiros às redes. Ficou ainda legislada a redução da componente estatal no sector eléctrico.

O mercado de electricidade Espanhol, foi criado com a introdução da competição no mercado no dia 1 de Janeiro de 1998 e engloba um conjunto de transacções derivadas da participação dos agentes de mercado, nas sessões dos mercados diários e intradiário.

O modelo do sector eléctrico Espanhol compreende a existência de dois sistemas: o sistema regulado e o sistema liberalizado.

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

Por seu lado, no sistema liberalizado, são estabelecidos bilateralmente contratos de transacções de electricidade entre os consumidores qualificados e os comercializadores.

Em Espanha desde 2003, é possível aos consumidores a escolha do seu comercializador de electricidade.

No sector eléctrico espanhol, os produtores são divididos em Produtores em Regime Convencional e Produtores em Regime Especial.

Os Produtores em Regime Ordinário vendem a sua produção através do *pool*, ou por contratos bilaterais. São considerados Produtores em Regime Especial todos aqueles que utilizam recursos renováveis com uma potência instalada até 50 MW e cogeração. A sua produção pode ser vendida à *pool* Espanhola, ou à tarifa fixada por decreto, que está indexada à tarifa de referência do sistema Espanhol.

No *pool*, existe um sistema de prémios e incentivos à Produção em Regime Especial, de modo a promover o investimento e a incentivar a sua apresentação ao mercado de modo a aumentar a sua liquidez.

Em Julho de 2007, o mercado espanhol de electricidade deu lugar ao Mercado Ibérico de Electricidade, o qual foi inspirado no próprio modelo do mercado espanhol de electricidade [10].

Capítulo 3

Mercados de Energia Eléctrica

O conceito mercado de energia eléctrica só nas últimas décadas tomou forma. Inicialmente devido, por um lado, às condicionantes físicas da electricidade e, por outro, às condicionantes de concorrência do sector, foi um conceito difícil de desenvolver.

A flutuação da procura da electricidade em diferentes horizontes temporais, como a hora, o dia, o mês e até o ano, juntamente com o facto de esta não poder ser economicamente armazenada, confere a este produto características muito próprias.

A variação do consumo de energia eléctrica reflecte-se directamente na variação da produção. Assim, existe a necessidade de o sistema eléctrico possuir reserva de produção para atender a essas flutuações e a outras que possam resultar de falhas nos grupos produtores ou a contingências no sistema de transmissão.

Se, às anteriores características da energia eléctrica juntarmos o facto de esta ser um bem essencial aos consumidores, resulta um mercado com um nível de complexidade elevado e com muitas problemáticas a ter em conta na sua estruturação.

Além das características referidas, o sector eléctrico ainda tem outra característica pouco comum. As redes eléctricas constituem um monopólio natural, já que, dificilmente se justifica e se consegue rentabilizar um investimento numa rede, ou segmento, de modo a fazer concorrência a outra.

Assim sendo, as actividades onde pode e deve ser fomentada a concorrência, são a produção e a comercialização da electricidade.

Como tal, o desenvolvimento de mercados de energia eléctrica foi um processo demorado, alvo de vários estudos e, como representa um conceito inovador, foi alvo de continuados ajustes e alterações, não havendo ainda um modelo consensual para o melhor desempenho do mesmo.

Na Europa, desde 1988, que a UE tem como meta a integração de todos os mercados regionais num único mercado interno Europeu. Este é um processo que tem vindo a ser longo.

A Europa começa agora a organizar-se em mercados regionais e colocam-se actualmente dúvidas se, a opção do mercado interno Europeu será a melhor solução.

Em contrapartida, há diversas análises que defendem que, vários mercados regionais são capazes de obter melhor desempenho do que um gigantesco mercado Europeu.

Naturalmente, com esta opção a problemática da capacidade de transporte das linhas de interligação é essencial, de modo a promover a eficiência e a melhoria da qualidade dos vários mercados regionais.

Neste contexto, prevê-se a criação de 8 mercados regionais Europeus:

- Ibérico (Portugal e Espanha);
- Nórdico (Dinamarca, Suécia, Noruega e Finlândia);
- Báltico (Lituânia, Estónia e Letónia);
- Italiano;
- Centro Europeu (França, Alemanha, Holanda, Bélgica, Luxemburgo, Suíça e Áustria);
- Sudeste Europeu (Croácia, Bósnia, Sérvia, Albânia, Montenegro, Macedónia, Grécia, Turquia, Bulgária e Roménia);
- Este Europeu (Eslovénia, Eslováquia, Republica Checa, Polónia e Hungria);
- Reino Unido e Irlanda [11].

Apesar de alguns destes mercados já se encontrarem em funcionamento, estima-se que, até a Europa estar assim organizada, demorará algumas décadas, em especial no Sudeste Europeu.

Se considerarmos as diferenças políticas e culturais daquela região, poder-se-á mesmo duvidar se, algum dia, o mercado regional de electricidade do Sudeste Europeu será uma realidade.

A existência de mercados já estabelecidos em alguns países, com diferenças legislativas consideráveis entre si, tem-se revelado complexa para a construção de mercados regionais mais abrangentes. Esta situação sucede principalmente na Europa Central.

O Mercado Ibérico de Electricidade é já uma realidade, sendo analisado em seguida com maior detalhe.

3.1 - MIBEL

O MIBEL, Mercado Ibérico de Electricidade, foi o resultado de um acordo entre a República Portuguesa e o Reino de Espanha para a constituição de um mercado regional de electricidade. Esta iniciativa encontra-se estrategicamente inserida no plano da CE visando a criação de um Mercado Europeu de Electricidade.

O acordo foi assinado em 1 de Outubro de 2004 e a sua posterior entrada em funcionamento em Julho de 2007 tornou o MIBEL no segundo mercado regional a nível Europeu a ser constituído.

Como aspectos importantes do acordo estabelecido entre os dois países temos a caracterização do mercado e as alterações legislativas que foram necessárias produzir de modo a viabilizar a entrada em vigor do mercado. [10]

O MIBEL contempla a liberdade e igualdade de acesso de todos os agentes a todas as plataformas de negociação, promovendo assim um regime de livre concorrência. Outros aspectos importantes são a transparência, liquidez e estabilidade do próprio mercado, bem como a preocupação com a qualidade de serviço e com a garantia de abastecimento de energia eléctrica.

O MIBEL é um mercado contínuo, assim como a necessidade de energia eléctrica por parte dos consumidores. Assim, o mercado encontra-se em funcionamento todo o ano, a toda a hora.

Este mercado adoptou várias características do modelo anteriormente em operação em Espanha. O modelo de funcionamento do mercado é Misto (*Pool* e Contratos Bilaterais) e existem duas zonas geográficas distintas de operação do sistema, Portugal e Espanha.

Para a entrada em funcionamento do MIBEL foram criadas duas entidades responsáveis pela gestão do mercado ibérico de energia: o *Operador del Mercado Ibérico de Energia* (OMIE), pólo Espanhol, e o Operador do Mercado Ibérico de Energia, pólo Português (OMIP). O OMIE é responsável pela gestão dos mercados diário e intradiário, enquanto o OMIP é responsável pela gestão dos mercados de derivados.

As entidades concessionárias das redes de transporte, a REN, em Portugal, e a REE, em Espanha, permaneceram como os Operadores de Sistema. Estes operadores têm como função a validação dos resultados obtidos no mercado, gerem a contratação dos serviços de sistema e os desvios dos programas contratados e operam o sistema em tempo real.

A ERSE, entidade reguladora em Portugal, dispõe de competências alargadas no que diz respeito à fixação das tarifas, assim como um conjunto de regras reguladoras de todo o sector eléctrico Nacional.

Nesse sentido a ERSE regula as seguintes actividades:

- Relativas à Entidade concessionária da Rede Nacional de Transporte: aquisição de energia eléctrica, gestão global do sistema e o transporte de energia eléctrica.
- Relativas aos distribuidores vinculados: distribuição de energia eléctrica, comercialização de redes, comercialização regulada e compra e venda de energia eléctrica.

Em Espanha, a congénere da ERSE é a CNE. Tem no entanto, funções menos abrangentes, sendo consultada aquando da fixação das tarifas.

Caso o mercado tivesse um desempenho mais positivo e sólido, não deveriam ser reguladas algumas tarifas, como o caso da tarifa de venda a clientes finais. Porém o mercado ainda se encontra longe de um funcionamento que permita a existência de confiança governamental suficiente de modo a aplicar essas medidas.

3.1.1 - Modelo em *Pool*

As singularidades descritas anteriormente em relação ao mercado de energia eléctrica originam que o mesmo funcione como uma bolsa de electricidade, ou *pool*, tendo sido inspirada num mercado *spot*.

Nos mercados de electricidade, as transacções são contratadas num período anterior ao consumo, funcionando tipicamente como um mercado *Day-ahead Market*. Isto significa que as propostas de oferta e compra de energia eléctrica são efectuadas no dia anterior, tendo como base, previsões dos consumos para o dia seguinte. No dia em causa, é efectuado um ajuste dos desequilíbrios, provocados pelas diferenças entre a previsão e o consumo real a cada instante[4].

Existem, na Europa, diferenças quanto ao funcionamento das bolsas de energia. Apesar de possuírem regras de base semelhantes, condicionantes de ordem geográfica, cultural ou simplesmente teorias de melhor desempenho, levam a diferenças na legislação em vigor para regular o funcionamento dos mercados de electricidade.

Isto significa que, mesmo tendo um modelo semelhante, as diferentes bolsas de electricidade mundiais possuem algumas diferenças.

As principais características diferenciáveis de organização das bolsas de electricidade são:

- Participação, voluntária ou obrigatória;
- Existência de ofertas do lado da procura;
- Existência de ofertas simples;
- Fixação dos preços ocorrer antes (*Ex-ante*) ou após (*Ex-post*) a entrega do produto;
- Existência de remuneração de disponibilidade;
- Existência de despacho integrado;

O MIBEL é uma bolsa com participação voluntária, permitindo ofertas do lado da procura e ofertas complexas do lado da produção. A fixação dos preços ocorre antes do consumo (*Ex-ante*), existindo remuneração da disponibilidade e não existindo despacho integrado.

Ex-ante significa que a fixação de preços de compra e respectivas quantidades de energia eléctrica é efectuada por meio de um leilão competitivo, tendo como base um consumo estimado anteriormente. O preço final de venda depende do preço de compra, assim como dos custos de serviço do sistema, de transporte e de distribuição, custo de perdas e a custos resultantes de medidas de conservação de energia ou apoio às energias renováveis. A partir desta fixação de preços, cada participante no leilão representa um potencial comprador ou vendedor no mercado, podendo fazer propostas de compra ou venda de energia eléctrica. Este processo é válido e singular para cada hora do respectivo dia a leilão.

Nos mecanismos de tipo *Ex-post*, que não se encontram em utilização na Europa, os preços são fixados a partir do fornecimento e da procura que forem realmente registados [12].

3.1.2 - Participação no Mercado

Os mercados de electricidade possuem duas formas de permitir a transacção de energia eléctrica, por meio de uma participação obrigatória ou por participação voluntária.

Nos mercados com participação voluntária, o *Pool*, representado pelo seu operador, ordena as propostas e realiza um despacho inicial baseado nos preços. Desta forma, são agregados os preços das ofertas de produção e das ofertas de consumo, estabelecendo-se assim o preço (pm) e a quantidade de equilíbrio (qm), tal como se ilustra na Figura 3.1.

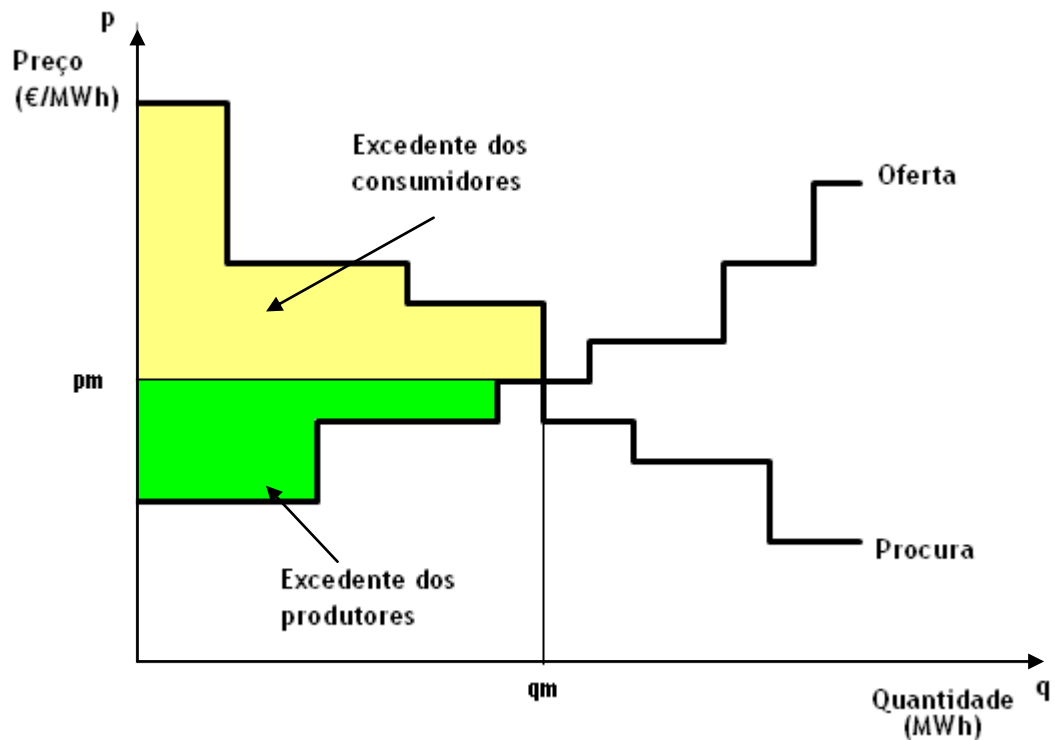


Figura 3.1 - Curvas de Oferta e Procura num mercado spot.

Esse preço de equilíbrio, ou de mercado, é o valor pelo qual serão remuneradas as unidades de produção que foram englobadas no despacho e é correspondente ao valor de mercado do grupo produtor mais caro pertencente ao despacho, sendo esse valor denominado de preço marginal do sistema.

Utilizando o mesmo raciocínio, o preço de mercado corresponde também ao valor que será pago por todos os agentes de mercado, que viram as suas propostas serem englobadas no despacho.

Associadas a esta definição, existem ainda dois conceitos, Excedente dos produtores e Excedente dos consumidores. Ambos reflectem a diferença entre o que foram as suas propostas e o preço de mercado.

Este modelo indica-nos ainda que o preço de mercado corresponde à maximização do excedente social, ou seja, a diferença entre o excedente dos consumidores em relação ao dos produtores, representado na Figura 3.1 pela soma das áreas coloridas.

O preço de mercado não corresponde ao preço de venda aos clientes. Como se sabe, os consumidores não têm acesso directo à bolsa de electricidade, surgindo a necessidade do aparecimento de intermediários que assumem essa função, sendo eles distribuidores ou comercializadores.

No mercado, há ainda a definição de clientes com preços não regulados. Isto significa que o preço a que adquirem a energia não foi submetido à regulação económica, comprando a energia a um comercializador.

O preço de venda a clientes finais, no sistema competitivo com bolsa obrigatória deveria estar directamente ligado ao preço de mercado da bolsa. Esta situação, na maioria dos mercados, não acontece, em grande parte, por causa do receio do poder político em relação ao mercado. Assim, é normalmente estabelecida uma tarifa máxima, à qual pode ser vendida a electricidade aos consumidores [13].

Deste facto resultam graves problemas para as entidades comercializadoras, que têm a responsabilidade de garantir o fornecimento aos seus clientes, podendo ocorrer a situação de vender aos consumidores a um preço menos elevado do que o preço de mercado, gerando assim prejuízo.

Como forma de contornar esta situação, foi criado em Inglaterra um novo modelo de participação no mercado, baseado na negociação voluntária entre as empresas da área de produção e da comercialização que transaccionam entre si, através de contratos bilaterais. Esta relação não está sujeita à regulação, porém, o uso da rede é evidentemente regulado.

Esta situação pode ir no sentido contrário ao inicialmente pensado para o sector eléctrico, aquando da sua desverticalização. Em alguns países, onde se adoptou esta metodologia, quase a totalidade da energia transaccionada passa por contratos bilaterais. Esta situação tem originado o aparecimento de grupos empresariais integrados, com elevado poder de mercado e que são auto-suficientes, o que pode levar a uma falsa dicotomia na relação Produtores/Comercializadores.

Como forma de contrariar este facto, pode desenvolver-se um modelo híbrido, em que será adoptado o modelo de contratos bilaterais, mas obrigando as entidades a negociarem uma determinada quantidade na bolsa.

Neste caso, a bolsa seria utilizada como um meio para transaccionar energia excedentária.

3.1.3 - Preço de Mercado

O conceito geral de preço de mercado, é o valor pelo qual um bem ou serviço é oferecido no mercado, sendo assim importante caracterizar o mercado em que determinado bem ou serviço está inserido, de modo a entender a volatilidade que lhe pode estar associada.

Os mercados podem assumir diferentes tipos de classificação:

- Concorrência Perfeita - mercado onde existem muitos compradores e muitos vendedores e onde nenhum agente consegue influenciar o preço das mercadorias;
- Concorrência Imperfeita - mercado onde existe muitos compradores e muitos vendedores porém existe diferenciação dos produtos;
- Oligopólio e Oligopsônio - mercado onde um pequeno número de empresas controlam a oferta, por conseguinte, o mercado. Nos Oligopólios isto acontece visto o número de vendedores ser reduzido, quando comparado com o número de compradores. Os Oligopsônios são mercados onde acontece o contrário, o número de compradores é reduzido, quando comparado com o número de vendedores;
- Monopólio e Monopsônio - mercado onde apenas um agente define o seu preço e a sua quantidade negociada. Nos Monopólios essa empresa é um vendedor, enquanto nos Monopsônios essa empresa é um comprador [1].

O mercado de electricidade, como foi referido anteriormente, é um mercado singular, e onde as suas características levam a que, com frequência, existam Oligopólios. Esta designação é atribuída devido poder de mercado implicado ao reduzido número de produtores.

Um indicador importante dos mercados é a sua elasticidade. Esta representa a sensibilidade de uma determinada grandeza, a variações noutra grandeza. Matematicamente, é traduzida como a variação percentual numa variável em resposta a uma variação de 1%, noutra variável.

A elasticidade pode ser aplicada ao preço da procura, preço da oferta e ao rendimento de um mercado.

A procura no mercado de energia eléctrica é considerada rígida pelo que a sua elasticidade é muito reduzida. Uma variação no preço de energia eléctrica pode originar mudanças na procura, porém essas mudanças são menores do que a variação verificada no preço. Este facto deve-se ao carácter essencial da energia eléctrica e à inexistência de fontes alternativas.

Se a variação no preço de energia eléctrica originasse uma maior variação proporcional da procura, isso significaria que se tratava de procura mais elástica.

3.1.4 - Capacidade de Transporte das Linhas de Interligação

A capacidade das redes é um factor essencial nos mercados de electricidade. Em mercados regionais, como o caso do MIBEL, a capacidade de transporte das linhas de interligação é de uma importância fundamental.

A gestão das restrições de natureza física e operacional das redes é da responsabilidade dos Operadores de Sistema. Esta entidade tem o dever de verificar o despacho e de ordenar um novo despacho, caso alguma restrição seja violada.

Devido à capacidade de transporte das linhas de interligação ser inferior à necessária, o MIBEL adoptou um mecanismo de gestão de congestionamentos, que se traduz na separação do mercado, *Market-Splitting*. Este termo inglês, na língua Portuguesa é traduzido por divisão do mercado, e a sua aplicação é essa mesma.

O mecanismo *Market-Splitting* actua quando a capacidade de transporte das linhas de interligação é atingida, criando duas zonas, que passam a ter preços diferentes [14].

A criação destas duas zonas requer que seja efectuado um novo despacho, o que provoca uma alteração no conjunto de unidades de produção que estavam programadas no despacho. Deste modo, a zona exportadora vê o seu preço de mercado baixar, uma vez que o último (ou últimos) gerador que estava incluído no despacho, deixa de o estar. Por seu lado, à zona importadora sucede a situação contrária, isto é, o preço sobe. Desta forma, é de notar a importância da capacidade de transporte das linhas de interligação, de modo a promover um melhor desempenho do mercado.

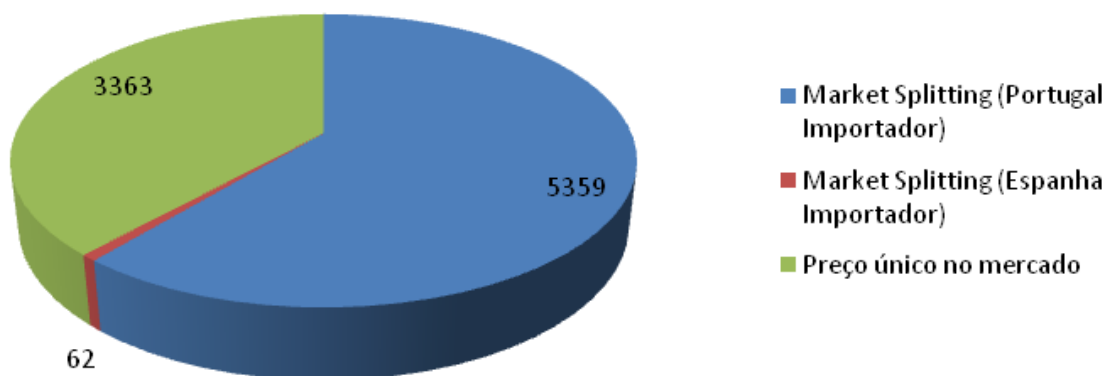


Figura 3.2 - Desempenho da capacidade de interligação do MIBEL em 2008

Como é ilustrado na Figura 3.2, o fenómeno de *Market-Splitting* ocorreu em 5421 horas do ano de 2008, representando assim 61,71% do total do ano.

Como é possível analisar, Portugal foi nesse ano no MIBEL um país essencialmente importador. A ocorrência do *Market-Splitting*, que é originado pela insuficiente de

capacidade de transporte das linhas de interligação, teve como consequência o aumento do preço médio em Portugal no ano de 2008 de 8,6%, relativamente a Espanha.

Estes indicadores de funcionamento do MIBEL indicam que esta área, a rede de transporte de interligação entre Portugal e Espanha, evidencia a necessidade de continuar promover o plano de investimentos de modo a aumentar a sua capacidade que neste momento é de 1700 MW.

O plano de desenvolvimento que a REN apresentou em 2008, prevê um aumento gradual da capacidade até 2014 de mais 1300 MW.

Por outro lado, o âmbito do MIBEL será limitado enquanto a sua capacidade de interligação com o mercado Francês não permitir o livre fluxo de energia.

Este será um ponto fundamental para que o MIBEL possa pertencer ao Mercado Europeu, o grande objectivo da EU.

3.1.5 - Operadores de Mercado

O MIBEL possui dois Operadores de Mercado o OMIE e o OMIP.

O OMEL, antecessor do OMIE, foi criado a 27 de Novembro de 1997, sendo o responsável pela gestão do sistema de ofertas de compra e venda de energia eléctrica no mercado diário Espanhol. Em 11 de Março de 2005, prevendo a entrada em funcionamento do MIBEL, a sua designação foi alterada para OMIE e assumindo a gestão do sistema do Mercado Ibérico de Electricidade.

É também responsabilidade do Operador de Mercado, a realização de actividades derivadas do funcionamento do mercado diário e intradiário de energia eléctrica.

Assim, a gestão económica do Mercado de Electricidade Ibérico está a cargo do OMIE.

O OMIP foi constituído a 16 de Junho de 2003 sendo a entidade gestora responsável pela gestão do mercado de derivados do MIBEL [15].

De modo a assumir as funções de Câmara de Compensação e Contraparte Central das Operações realizadas no mercado, foi criada a Sociedade de Compensação de Mercados de Energia, S.G.C.C.C.C., S.A. - OMIClear que é detida pelo OMIP.

O OMIP, enquanto entidade gestora responsável pelo funcionamento do mercado de derivados, desempenha as seguintes funções necessárias ao funcionamento do mercado:

- Admissão dos participantes;
- Definição e listagem dos contratos, bem como gestão da sua negociação;
- Promoção, em coordenação com a OMIClear, do registo das Operações;
- Prestação de informação relevante aos participantes e ao público em geral, relativamente ao funcionamento do mercado a prazo, designadamente através da publicação de um Boletim de Mercado;

- Supervisão, em coordenação com as Entidades de Supervisão, do funcionamento do mercado.

No OMIP negociam-se contratos de futuros, sendo a sua relevância para o corrente estudo, pouco significativa.

Mercado Diário

O mercado diário é a base do MIBEL e é gerida pelo OMIE. O seu objectivo é proceder às transacções de energia eléctrica para o dia seguinte, fazendo para tal o enquadramento das ofertas de venda e de aquisição de electricidade por parte dos agentes do mercado.

A legislação deste mercado é específica e obriga os agentes que quiserem estar no mercado, a respeitarem esses procedimentos.

Assim, o mercado diário tem como base a aquisição e venda de energia eléctrica para o dia seguinte. As ofertas dos produtores e dos compradores de energia eléctrica são apresentadas ao Operador de Mercado, analisadas e avaliadas tendo em consideração vinte e quatro períodos horários. A curva de ofertas dos produtores é formada por ordem crescente de preço, enquanto a curva de oferta de compra é formada por ordem decrescente de preço, representado na Figura 3.1. Da intersecção das duas curvas resulta o preço de mercado e a quantidade negociada [16].

Estes valores não são definitivos, como veremos em seguida, existindo ainda um mercado de ajustes (Mercado Intradiário).

Os produtores estão obrigados a aderir e a respeitar as leis de funcionamento do mercado, através da assinatura de um contrato de adesão.

Entre algumas dessas normas de funcionamento, está a proibição de usar de posição dominante no mercado, de forma a alterar os preços. Além deste facto, são obrigados a apresentar ofertas ao mercado diário, ofertas essas que são alvo da entidade reguladora, que pode pedir explicações para um inesperado aumento ou diminuição do preço. A entidade reguladora tem o poder de aplicar coimas, caso se verifique um aumento abusivo por parte de um produtor.

São dispensados de apresentar ofertas de venda de energia, os produtores que estejam comprometidos com um contrato bilateral, ou então, se a sua potência instalada for inferior a 50 MW.

Este processo é efectuado por hora para as vinte e quatro horas do dia seguinte propostas simples são ofertas de venda, apresentadas para uma hora específica onde os vendedores indicam um binómio, preço/quantidade para a sua unidade de produção.

O MIBEL contempla ainda a apresentação de propostas complexas por parte dos agentes de produção. Estas propostas assentam no facto de não ser economicamente rentável ou

tecnicamente possível a produção em blocos horários, devido a rampas de variação de potência, remuneração mínima diária, paragem programada ou condições de indivisibilidade do primeiro bloco [17].

Um exemplo prático pode ser dado através de centrais térmicas, que possuem um arranque demorado e que seria economicamente desastroso, estarem em funcionamento uma hora, deixando de o estar na hora seguinte, voltando a produzir passado duas horas. Esse facto iria provocar o aumento dos custos de arranque e paragem dessas unidades de produção, o que seria uma desvantagem grande em termos das condicionantes de concorrência desses agentes produtores.

A definição inicial do encontro de ofertas do mercado diário é publicada às 11 horas de cada dia, informação que é inserida com a comunicação da execução de contratos bilaterais e é fornecida aos Operadores de Sistema.

Os Operadores de Sistema realizam uma avaliação das condições de segurança das transacções acertadas no mercado diário acrescidas dos contratos bilaterais e apresenta o Programa Diário Viável de funcionamento antes das 13 horas, que pode conter alterações quanto ao inicialmente fornecido pelo mercado.

Mediante o Programa Diário Viável obtido, os Operadores de Sistema atribuem uma designação a algumas unidades de produção participantes no mercado inicial, considerando-as na banda de regulação.

Estas unidades de produção são as que se situaram perto do preço de mercado (fazendo ou não parte do despacho), pois no decurso real do mercado ocorrem variações na carga, que obrigam à inserção de unidades não atribuídas no despacho, ou inversamente [18].

Mercado Intradiário

O Mercado Intradiário tem por objectivo atender, mediante a apresentação de ofertas de venda e aquisição de energia eléctrica por parte dos agentes do mercado, aos ajustes sobre o programa diário viável definitivo. Assim, é efectuada a gestão dos desvios entre as quantidades previstas e os programas de produção/consumo.

O mercado intradiário é estruturado actualmente em seis sessões, com a seguinte distribuição de horários por sessão: 16 horas, 21 horas, 1 hora, 4 horas 8 horas e 12 horas.

As duas primeiras sessões são as únicas que ainda decorrem no dia anterior ao dia em consideração do mercado.

As sessões vão-se sobrepondo, sendo, que a sua abrangência real vai desde quatro horas após o início da sessão, até ao fim do dia. Para estes períodos o mercado está aberto à livre apresentação de propostas por parte dos agentes que tenham participado no mercado diário, que tenham estabelecido contratos bilaterais, ou que tenham declarado indisponibilidade (ficando posteriormente disponíveis).

Por cada unidade de produção ou aquisição poderão ser apresentadas múltiplas ofertas de compra ou venda, sendo, o único requisito, respeitar os compromissos assumidos em relação a serviços auxiliares no programa diário viável.

As sessões duram 45 minutos, à excepção da 1ª sessão, que decorre às 16 horas e que dura 1 hora e 45 minutos.

À imagem do mercado diário, após o final da sessão é efectuada a concertação entre as ofertas de compra e de venda para as diferentes horas compreendidas na sessão. Após a análise meramente económica das ofertas, cabe aos Operadores de Sistema a validação do despacho, ou a introdução de mecanismos de serviços complementares e gestão de desvios. Caso estes mecanismos não sejam suficientes, pode haver a necessidade de alocar novas unidades de produção, o que constitui a aplicação de procedimentos especiais, ou de emergência.

Contratos Bilaterais Físicos

Estes contratos são efectuados entre entidades produtores e comercializadoras ou distribuidoras. As condicionantes contratuais económicas são da inteira responsabilidade das entidades que assumiram esses contratos, sendo necessário informar os Operadores de Sistema das suas condicionantes técnicas, de modo a que estes possam cumprir o seu papel de assegurar a viabilidade técnica dos despachos efectuados na rede. Estes contratos são usualmente de média-longa duração e possuem uma forte componente normativa, que poderá alterar o preço base da negociação.

A sua utilização, confere aos agentes uma segurança acrescida quanto à volatilidade dos preços, procurando assim uma estabilidade dos preços de electricidade [2, 4].

Capítulo 4

Metodologia de Previsão

4.1 - Evolução das Metodologias de Previsão

As últimas décadas do século XX foram tempos de grandes desenvolvimentos no que diz respeito a técnicas de previsão. Em especial, a partir da década de 70, quando Box e Jenkins desenvolveram a pesquisa da metodologia ARIMA. Desde então, vários estudos de previsão foram baseados em séries não estacionárias e séries não lineares [19].

Nos anos 80, o desenvolvimento das tecnologias associadas aos computadores pessoais e todo esse sector, permitiu que séries temporais muito mais complicadas e extensas pudessem ser analisadas. A simplicidade com que, nos dias de hoje, se pode analisar uma série temporal é incomparável com o que era possível realizar a apenas uns anos atrás. Juntamente com o aparecimento de novas tecnologias de computadores pessoais e a sua expansão no mercado mundial, apareceu o conceito de Inteligência Artificial, em que se procura reproduzir o pensamento humano através das máquinas. Através deste conceito surgiu o desenvolvimento de Sistemas de Inteligência Computacional, técnicas computacionais de aprendizagem, que se baseiam na evolução da vida biológica.

Sistemas de Inteligência Computacional é um termo que engloba em diferentes técnicas como *Fuzzy Logic*, Algoritmos Genéticos e Redes Neurais Artificiais. Estas técnicas possuem problemáticas e metodologias próprias e procuram resolver através de abordagens convencionais, problemas complexos e de difícil resolução [20].

Como referido anteriormente, o sector eléctrico nos finais do século XX, sofreu grandes alterações, principalmente a nível estrutural que por sua vez despoletaram o aparecimento de novos problemas.

Um desses novos problemas correspondeu à necessidade de prever o funcionamento do sector, a vários níveis. Assim, o aparecimento de novas metodologias de previsão aplicadas ao Sector Eléctrico iniciou-se pelas aproximações regressivas, baseadas em séries temporais de potência activa.

Nos últimos 30 anos, foram imaginadas e aplicadas várias metodologias de modo a resolver problemas específicos de previsões no sector eléctrico. Algumas dessas aparecem para colmatar os vazios de conhecimento, mantendo-se em utilização.

Mediante um leque tão vasto de metodologias disponível, há a necessidade de escolher convenientemente o método a utilizar para a resolução de cada problema.

A previsão no sector eléctrico tornou-se uma ferramenta vital no planeamento do SEE, particularmente importante na previsão de consumos, de modo a melhorar a gestão do parque produtor, bem como a da rede de transporte e de distribuição e os respectivos, e também de modo a melhorar os algoritmos de calendarização de acções de manutenção.

Nos dias de hoje, a previsão é feita a vários níveis pelas diversas entidades que operam no sector. A previsão é usada em funções de regulação de tensão e de frequência, assim como, no consumo e preço de mercado.

A previsão de curto e médio prazo continua a ter relevo no sector, porém com a complexidade dos SEE, surgiu o aparecimento da previsão de muito curto prazo, que visa um melhor desempenho do SEE, a nível do seu controlo de qualidade.

O aparecimento dos sistemas de Inteligência Computacional, em especial de Redes Neurais Artificiais (ANN), originou uma melhoria significativa nos sistemas de previsão, dada a sua capacidade de aprendizagem e adaptação a séries temporais.

A literatura indica que as ANN são uma ferramenta poderosa de previsão no sector eléctrico, dados os seus resultados na estimação de consumos e preços do mercado [21, 22]. Esta situação deve-se ao facto do mercado de electricidade ser peculiar (referido no Capítulo 3), ou seja, o mercado não pode ser analisado como se de uma série temporal normal se tratasse. A forma como se estimam séries temporais de mercados como acções, moedas ou outros bens essenciais, é bastante diferente da forma ideal de efectuar uma previsão num mercado de electricidade.

Uma das principais vantagens das ANN em relação à grande maioria dos modelos estatísticos utilizados na previsão de séries temporais, reside no facto destes possuírem limitações associadas ao modo de estimação de parâmetros, sendo necessária a supervisão por parte de um analista, repetindo assim os processos. Nas ANN, a previsão pode ser feita de forma automatizada, pois o seu conhecimento é adquirido através da comparação com dados anteriores. Por seu lado, a desvantagem das ANN reside no facto de dependerem da qualidade da série temporal que é utilizada no seu treino. Uma série temporal demasiado pequena pode não ter dados suficientes para que a ANN aprenda correctamente os seus padrões, e ao inverso, uma série temporal demasiado grande pode resultar num tempo elevado até conseguir gerar soluções adequadas [23-25].

Assim, pelo descrito anteriormente e sendo uma das principais características das ANN a sua velocidade, para a realização deste estudo optou-se pela utilização da sua metodologia. De modo a maximizar a velocidade de funcionamento desta ferramenta, devem ser

respeitadas algumas condições, no que à configuração da rede e aos conjuntos de dados diz respeito.

A configuração da rede não deverá ser muito extensa, para que o número de conexões não seja muito elevado. Os conjuntos de dados deverão ser homogêneos, já que uma maior semelhança entre os exemplos, representa uma maior velocidade no processo de aprendizagem. Assim, é recomendado o uso de funções que standardizem os conjuntos de dados. Por fim, o conjunto de dados não deverá ser demasiado complexo e grande.

4.2 - Redes Neurais Artificiais

As ANN são modelos matemáticos que têm por base o funcionamento do cérebro humano e que são utilizadas na modelação da memória associativa, no reconhecimento de padrões e entre outras, na previsão de séries temporais.

Uma ANN é um processador que funciona em paralelo, composto por unidades de processamento, que possui uma propensão natural para armazenar conhecimento e torná-lo disponível para o utilizador. O seu comportamento é semelhante ao do cérebro humano, pois o conhecimento é adquirido a partir do exterior, através do que se designa de processo de aprendizagem, sendo esse conhecimento armazenado no que se designa por conexões. Estas conexões, tal como acontece na natureza, são os elementos que identificam a função da ANN.

Deste modo, ao proceder-se ao treino de uma rede neuronal, o que realmente se efectiva é o ajustamento das suas conexões (podem também ser designados por pesos), tendo como objectivo atingir um determinado resultado, designado por Alvo. Na sua constituição básica, uma rede neuronal é um comparador, não linear que procura ajustar determinadas entradas a um conjunto de saídas, aprendendo através dessa experiência de forma a poder utilizar-se no futuro.

Do ponto de vista matemático, as ANN podem ser vistas como um método comparador, já que possuem a capacidade de aproximarem praticamente qualquer função.

Então, como principais vantagens deste processo, temos o facto de ser possível resolver problemas não linearmente separáveis, assim como a sua capacidade de aprendizagem a partir de exemplos, ou seja a partir da relação Entrada/Alvo [23-25].

4.2.1 - Fundamentos Biológicos Associados

A investigação sobre as ANN foi iniciada e inspirada pelo sistema nervoso dos seres vivos, que apresenta uma estrutura altamente complexa, não linear e paralela.

O constituinte base dos sistemas nervosos dos seres vivos é o neurónio.

O neurónio biológico é a unidade básica do cérebro, uma célula complexa que responde a sinais electroquímicos captados pelas dendrites e que é composto por um núcleo, por um

corpo celular e por um axónio, que transmite estímulos a outros neurónios através das sinapses, como se ilustra na Figura 4.1.

Os neurónios usualmente agrupam-se em camadas constituindo estruturas anatómicas com diferentes funções.

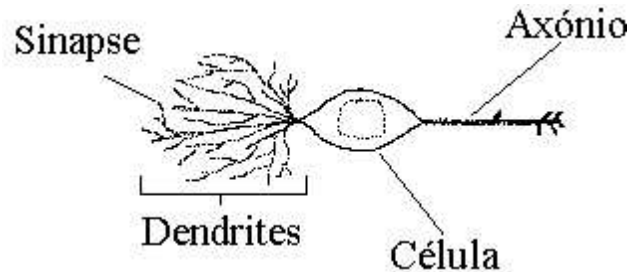


Figura 4.1 - Representação simplificada de um neurónio biológico.

O processo de aprendizagem ocorre quando acontecem sucessivas e efectivas modificações nas sinapses, que interconectam os neurónios. À medida que novos eventos vão sucedendo, determinadas ligações são reforçadas, enquanto outras são enfraquecidas.

A velocidade de processamento de um neurónio é aproximadamente 5 a 6 vezes mais lenta, do que uma porta lógica de silício. No entanto, o cérebro consegue ultrapassar este facto através da sua estrutura maciçamente paralela. Na literatura, estima-se que o córtex humano possui cerca de 10 biliões de neurónios e 60 triliões de sinapses, sendo assim explicada a velocidade de processamento do cérebro humano.

4.2.2 - Fundamentos das ANN como modelo matemático

Os neurónios artificiais são as unidades de processamento das ANN. Existe correspondência directa das suas entradas e saídas com as sinapses e axónios dos neurónios biológicos.

Uma ANN possui neurónios artificiais, um processamento interno não linear, entradas e uma saída. Como já foi referido, às ligações dos neurónios estão associados pesos (W), que alteram o valor dos sinais emitidos.

Usualmente os neurónios artificiais, assim como os biológicos, estão colocados em camadas com ligações unidireccionais, sempre num sentido progressivo, das entradas para a saída.

Na Figura 4.2 encontra-se a representação de um neurónio artificial, onde X_n são as entradas, y a saída, W_n os pesos das ligações e $f(a)$ é a função de activação do neurónio [26].

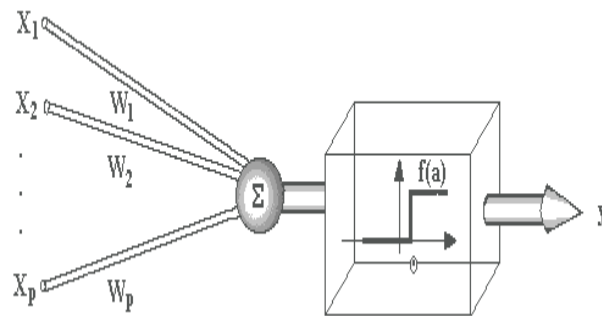


Figura 4.2 - Representação de uma unidade de processamento (neurônio artificial).

É através da função de transferência que é possível a introdução de componentes não lineares na ANN. Estas podem ser de diferentes tipos, sendo as mais utilizadas:

- Hard-Limit: os valores de saída desta função são 0 e 1 (representada na Figura 4.2).
- Linear: os valores de saída desta função correspondem a toda a gama do conjunto Real, e existe correspondência directa entre a entrada e as saídas.
- Log-Sigmoid: os valores de saída variam entre 0 e 1.
- Tan-Sigmoid: os valores de saída variam entre -1 e 1.

A escolha da função de transferência é feita em função dos dados, visto que elas diferem entre si, tendo em conta o intervalo de saída do neurônio que permitem.

As funções Log-Sigmoid e Tan-Sigmoid possuem na sua formulação uma variável k correspondente à sua inclinação. Ao variar-se o k , obtêm-se diferentes declives.

4.2.3 - Processo de Aprendizagem

As ANN possuem diversos tipos de classificações sendo, talvez, a mais importante a sua caracterização quanto à forma de aprendizagem em redes, na qual podem ser supervisionadas, não supervisionadas, ou forçada.

Na aprendizagem com supervisão são sucessivamente apresentadas à rede conjuntos de padrões de entrada e seus correspondentes padrões de saída. Durante o processo, a ANN realiza uma aproximação dos pesos das conexões segundo uma determinada lei de aprendizagem, até que, o erro entre os alvos e os padrões de saída gerados pela rede seja inferior a um valor mínimo especificado.

Nos processos sem supervisão a ANN analisa as entradas, determina algumas das suas propriedades e aprende a reflectir estas propriedades nas saídas, pela modificação dos pesos das ligações. Para tal, a rede utiliza padrões, regularidades e correlações para agrupar os conjuntos de dados.

A aprendizagem forçada é uma técnica similar à aprendizagem com supervisão. Porém, não são fornecidas as saídas, sendo implementado um sistema de prémios ou penalizações, relativo ao desempenho do resultado obtido.

Cada tipo de aprendizagem possui vários algoritmos de treino das ANN. O algoritmo de treino mais usual de aprendizagem supervisionada, é o *Back-Propagation* e foi o escolhido para a realização deste trabalho.

O algoritmo de *Back-Propagation* é uma generalização do método dos mínimos quadrados, devido à sua utilização do gradiente interactivo para minimizar a função, sendo igual à diferença média quadrática entre o Alvo e o resultado obtido.

Este algoritmo visa a determinação dos pesos das ligações entre os diversos neurónios da rede. Em cada iteração é calculada a diferença entre o resultado obtido e o Alvo, ou seja o erro (ε).

Em seguida, utilizando um algoritmo recursivo, representado pela Eq. 4.1, o erro vai ser propagado em sentido contrário até às entradas da rede [27].

Na Eq. 4.1 está representada com a letra η a taxa de aprendizagem da rede.

$$\Delta_{w_{kj}} = -\eta \frac{\delta \sum \varepsilon^2}{\delta w_{kj}} \quad (4.1)$$

Assim, no processo de treino com o algoritmo de *Back-Propagation* são realizados os seguintes passos:

1. Inicialização dos pesos e *offsets* dos elementos de processamento;
2. Apresentação das Entradas e Saídas desejadas;
3. Cálculo das saídas da rede e avaliação do seu erro;
4. Actualização dos pesos, através do algoritmo recursivo;
5. Repetição do processo, a partir do passo 2.

O processo acaba quando no passo 3, o erro calculado for mais pequeno que o desejado.

4.2.4 - Arquitectura

As ANN podem ainda ser classificadas como unidireccionais ou recorrentes.

As redes unidireccionais ou *feed-forward* são as mais utilizadas, funcionando de forma progressiva, e são de utilização mais simples pois não possuem informação adicional acerca das camadas anteriores. Foi a arquitectura *feed-forward* a escolhida para a realização deste trabalho.

As redes recorrentes, (com realimentação ou *feed-back*), possuem conexões entre neurónios com diferentes sentidos das camadas de neurónios, o que as torna mais complexas. São usadas noutro tipo de desenvolvimento de previsões.

Um aspecto essencial da arquitectura das ANN está associado à escolha do número de camadas e do número de neurónios da camada escondida, visto que não existe nenhuma metodologia que indique a arquitectura óptima a adoptar para cada problema. Assim, e apesar de existirem na literatura da especialidade várias abordagens relacionadas com o tema, optou-se por tentar otimizar a escolha durante a fase de treino, comparando valores de performance das várias ANN treinadas [28].

Os resultados que levaram à escolha da ANN estão descritos no Capítulo 6.

A sua arquitectura possui 3 neurónios na camada escondida e respectivamente 14 variáveis para o cálculo de cada saída. Assim, foram utilizadas 336 entradas para se obter a previsão para as 24 horas, como é o objectivo deste trabalho. Na Figura 4.3 está ilustrada a da arquitectura simplificada da rede neuronal, de modo a obter-se uma saída.

A informação inserida contempla o mês do ano, o dia da semana, a hora, o Preço de electricidade nos dias n-2 a n-8, assim como o preço do *Brent* nos dias n-2 e n-7.

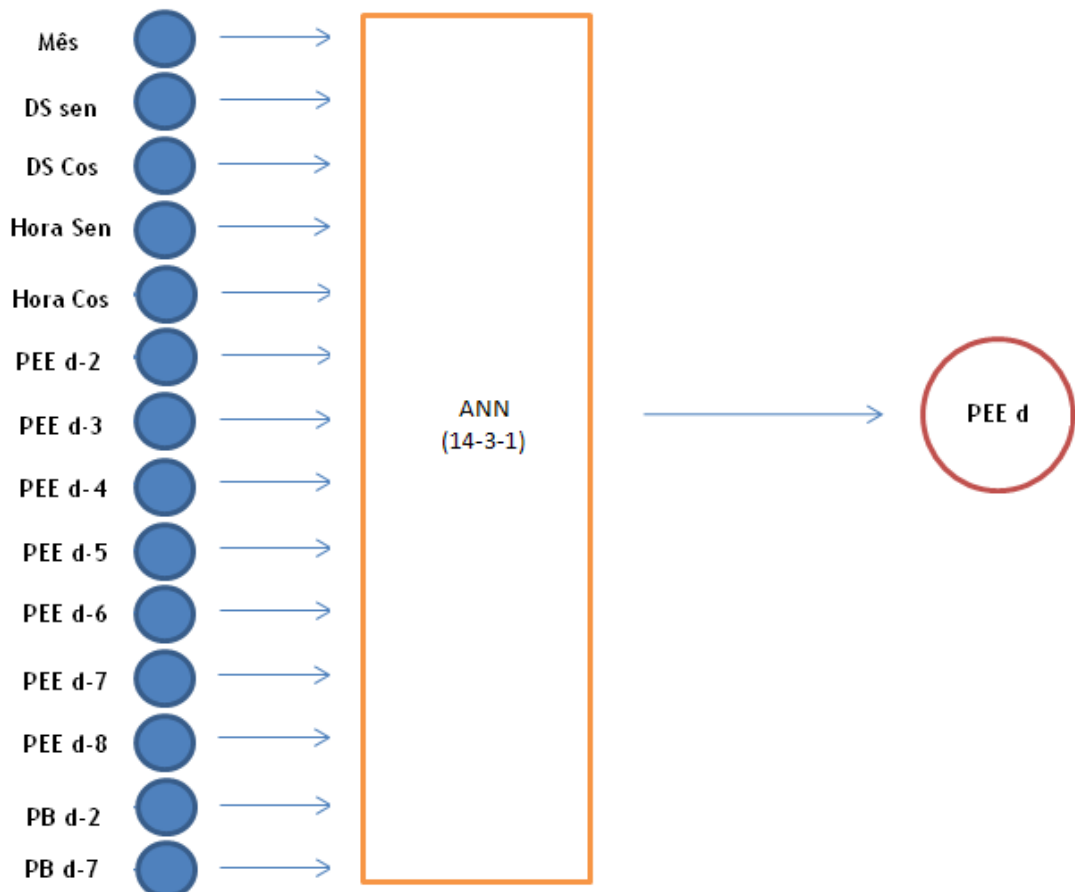


Figura 4.3 - Arquitectura simplificada da ANN com o melhor desempenho.

Na figura 4.3 encontram-se algumas abreviaturas que foram usadas neste estudo. Assim, DS significa Dia da Semana, PEE significa Preço da Energia Eléctrica e PB Preço do Brent.

Foram utilizadas duas variáveis cíclicas, para melhor definir a Hora e o Dia da Semana. Esta medida é especialmente vantajosa durante o procedimento de treino, informando a ANN da componente cíclica das referidas variáveis. Com este procedimento deixa de haver salto entre as 24 horas e a 1 hora, por exemplo.

De modo a comparar a performance da ANN escolhida, foi utilizado o MAPE - *Mean Absolute Percentage Error* -, (Eq. 4.2) que representa o erro absoluto percentual médio. Este indicador compara o resultado obtido pela previsão (y_k) com o resultado real do mercado (a_k) [29].

Os resultados obtidos nas simulações realizadas são apresentados no capítulo 6.

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{k=1}^N \left| \frac{a_k - y_k}{\left(\frac{a_k + y_k}{2}\right)} \right|}{N} * 100\% \quad (4.2)$$

4.2.5 - Software Utilizado

Para a realização deste projecto, foi utilizado o *Microsoft Excel* como ferramenta de compilação e tratamento de dados e análise de resultados.

O software escolhido para a realização da previsão foi o *MATLAB* versão 7.7.0 (R2008a), visto conter uma ferramenta denominada de *Neural Network Toolbox V6.0* que possui uma interface apelativa e de fácil utilização para o treino de ANN, a *Neural Network Fitting Tool* (nnftool).

Esta ferramenta subdivide o conjunto de treino em subconjuntos denominados Treino, Validação e Teste, solicitando ao utilizador que determine as percentagens de dados do conjunto de Treino a utilizar em cada um dos seus subconjuntos. Optou-se por utilizar, as percentagens de 70%, 15% e 15%, respectivamente para os subconjuntos Treino, Validação e Teste.

Seguidamente é necessário introduzir as séries de dados relativas à Entrada e ao Alvo, para que se possa proceder ao treino da ANN.

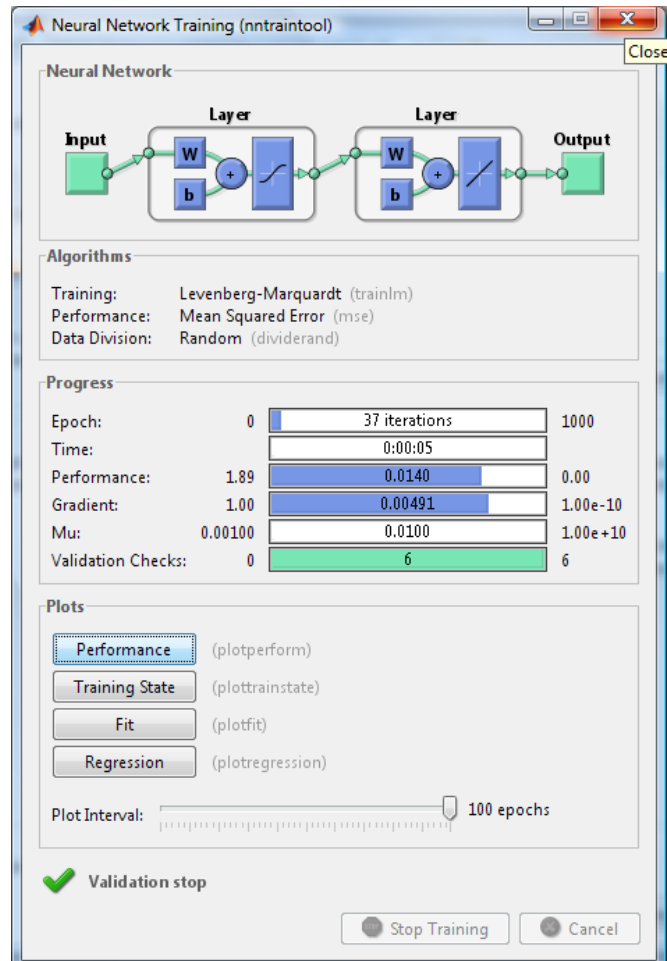


Figura 4.4 - Imagem retirada da ferramenta *nnftool* do software *MATLAB*, relativa ao processo de treino da ANN.

Esta ferramenta usa a função de treino *Trainlm*, que é baseado no método de *Back-Propagation*, algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, como pode ser visualizado na Figura 4.4.

Pela visualização da figura 4.4, podem-se visualizar os parâmetros pré-definidos do algoritmo *trainlm*, sendo eles:

- 100 *epochs*, o numero máximo de épocas a treinar;
- A performance desejada de 0,005;
- O gradiente mínimo igual a $1 \times e^{-10}$;
- Mu inicial igual a 0,001;
- Mu máximo igual a $1 \times e^{10}$;
- Não foi definido um tempo máximo para o treino da rede;
- Número de validações exigidas para parar o treino igual a 6.

Mu representa a variável de adaptação da ANN.

O processo de treino termina quando, o erro é menor do que a performance desejada, o valor da variável μ é maior do que o seu valor máximo permitido, o gradiente é menor do que o valor especificado para o gradiente mínimo e a performance do conjunto de validação incrementa mais vezes do que aquilo que é permitido.

Esta ferramenta possui um indicador de performance denominado *MSE*, *Mean Squared Error*, que se traduz pelo quadrado da diferença média entre as Saídas e os Alvos, tendo sido este o parâmetro que foi adoptado para conduzir o processo de selecção da arquitectura da ANN.

Após o treino realizado pela ferramenta *nnftool*, a informação sobre a rede é exportada para o *MATLAB*.

Em seguida, utilizando a ferramenta *nnntool* - *Neural Network Tool* é efectuada a previsão importando para a ferramenta a informação da ANN, previamente treinada, juntamente com as variáveis de entrada (*Input data*) do conjunto que se designou por Teste. A rede fornece as saídas que constituem o resultado da previsão.

Capítulo 5

Dados dos Conjuntos de Treino e Teste

Neste estudo foram utilizados dados de origem temporal e económica. As variáveis de origem temporal servem de apoio à caracterização das variáveis económicas.

A série de preços de energia eléctrica, variável económica, foi retirada directamente do Operador de Mercado, OMEL, visto estar disponibilizada no seu sítio de internet. A importância destes dados é fulcral, já que representam tanto as Entradas como o valor desejado, o qual se denominará por Alvo, da ANN.

De forma a explicar possíveis alterações nos preços de energia eléctrica, foi introduzida uma variável referente ao preço do *Brent*, sendo em seguida explicada a sua relação com o preço da energia eléctrica.

De salientar a introdução de uma variável temporal para contemplar excepções, os feriados.

O horizonte temporal em análise neste estudo foi de 24 horas, tendo a escolha das variáveis sido feita em conformidade com esse facto. Os dados contemplam todo o ano de 2008, assim como os quatro primeiros meses de 2009.

O período entre 1 de Janeiro de 2008 e 28 de Fevereiro de 2009 foi considerado como conjunto de treino, enquanto os meses de Março e Abril de 2009 representam o conjunto de teste. O conjunto de teste é posterior ao conjunto de treino de forma a simular o que acontece na realidade. Por outro lado, o período correspondente ao conjunto de Treino perfaz um total de 61 dias, a que correspondem 1464 saídas.

Os conjuntos de treino e de teste são constituídos pelas Entradas e pelos Alvos descritos anteriormente.

Na literatura pode-se encontrar várias teorias quanto à dimensão óptima do conjunto de treino. Adoptando a metodologia proposta por *Hush*, em 1989, que observou que pelo menos o conjunto de treino deve ser igual a $30 \times N_i(N_i + 1)$, sendo N_i o número de entradas, significa que pelo menos, este conjunto de treino deveria ter 6750 exemplos.

Como conjunto de treino foram utilizados dados que compreendem o período entre 1 de Janeiro de 2008 e 28 de Fevereiro de 2009. Este período perfaz um total de 425 dias, e corresponde a 10200 Alvos diferentes, verificando assim a condição proposta por *Hush* [30].

Porém, é importante salientar que neste trabalho falar-se-á de dois conjuntos de teste diferentes. A função *trainlm* utilizada pelo *MATLAB* cria dentro do conjunto de treino, três subconjuntos: treino, teste e validação. A finalidade da criação destes subconjuntos, deve-se sobretudo a critérios de paragem do algoritmo, fornecendo igualmente indicadores de desempenho para os vários subconjuntos. Assim e com base no indicador MSE, foram escolhidas as melhores arquitecturas da ANN para análise, sendo rejeitadas algumas variáveis que estavam a ser consideradas como entrada, como o caso do Dia do Mês.

5.1 - Entradas

As entradas consideradas da ANN são os dados dos quais depende potencialmente o preço da energia eléctrica. Foram analisados vários tipos de entradas, sendo algumas inevitavelmente influentes na variação do preço de energia eléctrica. Noutras foi observada a sua dependência através do teste de ANN que as continham. Na secção 5.4 serão analisadas as diversas variáveis consideradas.

5.2 - Alvos

No software utilizado, este conjunto de dados é denominado por *Target*. A palavra *Target* é inglesa e em português significa Alvo. Assim, os dados em causa constituem o alvo da previsão e representam o preço da energia eléctrica para as 24 horas de cada dia. Como foi referido anteriormente, o objectivo da ANN é aprender como um conjunto de entradas origina um determinado Alvo e, em seguida, proceder ao cálculo das Saídas.

5.3 - Saídas

As saídas da ANN correspondem à previsão. Assim, teremos 24 saídas por cada dia considerado no conjunto de teste, que representam os 24 preços de energia eléctrica correspondente às 24 horas de cada dia associado à previsão.

5.4 - Variáveis

Nesta secção são referidas as variáveis que foram analisadas de modo a serem consideradas ao construir a ANN.

5.4.1 - Variáveis Temporais

Ano

A variável temporal Ano, apesar de ter sido considerada como potencial entrada para a ANN, não foi aceite. Este facto encontra-se explicado na Capítulo 6, relativo à escolha da ANN com melhor desempenho. Num outro estudo que contemple uma base de dados mais alargada do ponto de vista temporal, seria uma variável a ter em consideração, especialmente para se poderem analisar variações substanciais, que pudesse ter ocorrido num determinado período.

Mês

No que diz respeito ao Mês do ano, as suas condicionantes climatéricas provocam alterações de vária ordem, influenciando assim o consumo de energia eléctrica, bem como o seu preço. Esta variação está relacionada com os custos marginais das centrais que se encontram a produzir. Nos meses de maior pluviosidade, há maior produção nas centras hídricas, as quais têm os seus custos marginais mais baixos, levando a que os preços no mercado diário tendam a ser menores do que nos meses mais secos. Nestes, por sua vez, o nível hidrológico não permite grande produção nas centrais hídricas, surgindo assim o aumento de produção por parte das centrais térmicas, que possuem custos marginais mais elevados. Então, esta variação faz com que o Mês do ano seja uma variável indispensável como entrada para a ANN.

Dia da Semana

A variável Dia da Semana (DS) é considerada indispensável como entrada para a ANN. O principal factor para se considerar esta variável reside no facto de se verificar um consumo diferenciado, o qual pode ser padronizado nos diferentes dias da semana. Em consequência, existe uma grande diferença entre o preço de energia eléctrica num dia da semana e num dia de fim-de-semana.

A diferença de preço anteriormente referida pode ser explicada pela diminuição do consumo nos dias de fim-de-semana, o que significa que, alguns dos grupos produtores, que normalmente o fazem nos dias de semana o deixam de fazer. Ficam assim a produzir os grupos produtores com menor custo marginal, o que origina uma diminuição do preço de energia eléctrica.

Dia do Mês

No que concerne ao Dia do Mês não foi possível encontrar uma relação com o preço de energia eléctrica. Foi realizada esta análise, pois poderia haver uma relação padrão que explicasse um possível aumento ou diminuição, em determinados períodos do mês.

Nestas condições, a variável Dia do Mês não foi aceite como entrada para a ANN.

Hora

A correlação da Hora com o preço de energia eléctrica é facilmente constatada através da observação da sua evolução no período de um dia. Existe um padrão que relaciona os diferentes períodos horários de um dia, com o consumo e com o preço da energia eléctrica.

Nas primeiras horas do dia, o preço permanece baixo, atingindo o seu mínimo por volta das 5h. Após este ponto, o preço começa a subir até atingir um pico por volta das 11h. Em seguida, o preço tem uma baixa pequena sensivelmente até meio da tarde, altura em que volta a subir até atingir o seu máximo entre as 20h e as 21h. Seguidamente, o preço começa a descer até atingir o seu valor mais baixo às 5h do dia seguinte. Este processo é cíclico e padronizado.

Como tal, é possível constatar a relação entre o preço de energia eléctrica e as diferentes horas do dia, tendo-se considerado esta variável indispensável como entrada para a ANN.

Feriados

Do ponto de vista de um estudo de previsão, os feriados são um fenómeno que afectam o consumo de energia eléctrica e afastam dos parâmetros normais estabelecidos pela periodicidade temporal.

Existem dois tipos de feriados: os que têm um dia específico e aqueles que varia o dia de calendário em que ocorrem consoante o ano em questão. De tal modo, é complicado estabelecer uma ANN que consiga detectar estas variações e prever as alterações daí decorrentes.

Por outro lado, o estudo em questão tem problemas geográficos no que diz respeito a este tema já que, para além de contemplar um mercado que integra dois países diferentes, Portugal e Espanha, contempla também, uma série de regiões diferentes dentro de cada país, sendo que, cada uma, tem os seus costumes e tradições. Portanto, a utilização de uma variável para definir um dia como sendo feriado, deve ser feita com os devidos cuidados.

A variável Feriado possui ainda outra condicionante, que é o facto de que nem todos os feriados se comportarem da mesma maneira no que diz respeito ao consumo de energia

eléctrica. Feriados festivos, 1 de Janeiro e o Carnaval, comportam-se, em termos de consumo de energia, de maneira completamente diferente de feriados como o Natal ou a Páscoa, principalmente durante a madrugada, onde existe um aumento significativo do consumo de energia eléctrica devido aos festejos e comemorações que nesses dias decorrem.

Assim, foram considerados os valores indicados na Tabela 5.1 para a variável Feriado.

Tabela 5.1 - Valores da variável Feriados

0	Dia não Feriado
1	Feriado em Portugal
2	Feriado em Espanha
3	Feriado em Portugal e Espanha
4	Passagem de Ano e Carnaval

Deste modo, os feriados de cariz regional não foram representados, considerando que o seu efeito não afectaria o preço da energia eléctrica de forma significativa.

Relativamente à distinção entre Portugal, Espanha, Portugal e Espanha e 1 de Janeiro e Carnaval, esta relaciona-se com o que foi englobado nos diferentes efeitos, de que cada feriado representa para o preço da energia eléctrica, de modo a que a ANN possa obter melhores performances.

5.4.2 - Variáveis Económicas

Preço do *Brent*

O *Brent* é o índice que segue o preço do barril de petróleo em Londres e é considerado como referência na Europa. Isto significa que é o índice normalmente usado na aquisição de petróleo por parte das empresas que operam no Mercado Ibérico de Electricidade.

Por outro lado, o preço do *Brent* também serve como indicador para o *Zeebrugge*, o mercado de gás de curto prazo, líder na Europa Continental.

Desta forma, o Preço do *Brent* está directamente relacionado com o custo marginal das centrais térmicas, que representam uma parte significativa do parque de geradores da Península Ibérica.

Visto isto, pode-se justificar o uso desta variável como entrada da ANN. A sua influência pode ser variada, mas existe a clara indicação de existir uma relação entre o Preço do *Brent* e o Preço de Energia Eléctrica.

Por razões de carácter temporal, as variáveis usadas como entrada da ANN foram o preço de fecho de sessão do *Brent* do dia $n-2$ e do dia $n-7$.

Como esta previsão é efectuada para um horizonte de 24 horas, para se utilizar o preço de fecho de sessão do *Brent* do dia $n-1$ seria necessário esperar que a sessão terminasse. Isto significa que a previsão não poderia ser efectuada a qualquer altura. Assim, optou-se por utilizar o preço de fecho de sessão do *Brent* do dia $n-2$, visto ser o valor disponível mais recente do *Brent*.

Por outro lado, através de coeficientes de auto-correlação, podemos constatar que o preço do *Brent* no dia n está correlacionado com o *Brent* verificado no dia $n-7$. Esta correlação justifica a utilização desta variável como entrada da ANN.

Preço de Energia Eléctrica

O Preço de Energia Eléctrica em dias anteriores, é uma variável importante para a previsão do preço de energia eléctrica, do dia em questão. Como referido anteriormente, os hábitos de consumo provocam comportamentos singulares referentes a cada dia, comportamentos que se traduzem num padrão e que pode ser analisado através de coeficientes de auto-correlação. De outros estudos, tem-se conhecimento que os resultados de auto-correlação conferem maior destaque à relação entre o dia da previsão e o dia anterior e o mesmo dia duma semana antes, respectivamente os dias $n-1$ e $n-7$.

Neste estudo, optou-se por deixar à ANN o papel de escolher as entradas Preço de Energia Eléctrica que possam melhorar o seu desempenho. Para tal, foram considerados todos os valores do preço de energia eléctrica até um período de 8 dias, antes do dia a que a previsão diz respeito.

Em semelhança com a variável Preço do *Brent* do dia $n-1$, o preço de energia eléctrica do dia $n-1$ não pode ser utilizado como entrada para a nossa ANN por razões de índole temporal. Como os resultados do preço de energia eléctrica resultante do mercado intradiário vão sendo divulgados ao longo do dia, seria necessário esperar até ao fim do dia, para ter acesso aos valores finais que representam a entrada preço de energia eléctrica do dia $n-1$.

De modo à previsão ser efectuada antes da hora limite de entrega de ofertas no mercado diário para o dia n , o último valor final do preço de energia eléctrica conhecido é $n-2$, sendo este o último valor que foi considerado como entrada da ANN.

Assim optou-se por considerar como entradas da ANN o Preço de Energia Eléctrica do dia $n-2$ ao dia $n-8$.

A entrada Preço Energia Eléctrica do dia $n-8$ foi utilizada como forma de tentar substituir a influência na ANN da entrada Preço de Energia Eléctrica do dia $n-1$, visto esta não poder ser utilizada.

De referir ainda que, a variável preço de energia eléctrica do dia $n-x$ corresponde à variável com um desfasamento de x multiplicado por 24, havendo sempre correspondência directa entre as horas dos dias em questão.

Isto significa que, para uma determinada hora, num determinado dia, as entradas serão os valores dos oito dias anteriores (à excepção do dia anterior), nessa determinada hora.

5.5 - Estandarização dos Dados

É necessário que se proceda à estandarização dos dados para tornar o processo de aprendizagem das ANN mais rápido e mais eficiente. Se os seus dados estiverem normalizados os seus valores encontram-se na mesma ordem de grandeza, reduzindo-se os efeitos de escala e de polarização.

A estandarização consiste na transformação de valores que se encontram nas suas escalas reais, para uma escala a definir, de modo a promover a sua equalização.

Foram utilizados dois métodos para proceder à estandarização dos dados.

Por um lado, o método Min-Max que faz corresponder o Mínimo e o Máximo dos dados ao mínimo e ao máximo na nova escala, enquadrando os outros valores de forma proporcional. Este método foi configurado para converter todos os valores na gama de intervalo $[-1;1]$ e a conversão é realizada utilizando a Equação 5.1

$$v' = \frac{v - \min_a}{\max_a - \min_a} * (\max_A - \min_A) + \min_A \quad (5.1)$$

Em sintonia com o método Min-Max, por outro lado, foram utilizadas as funções *seno* e *co-seno*, de modo a manter o carácter cíclico das variáveis quando apresentadas à ANN, procedendo à transformação da variável em duas variáveis. Este processo foi efectuado nas variáveis cíclicas Hora e Dia da Semana, utilizando as fórmulas:

Para o Dia da Semana:

$$DS \text{ sen} = \text{sen}\left(\frac{2\pi d}{7}\right) \text{ e } DS \text{ cos} = \text{cos}\left(\frac{2\pi d}{7}\right) \quad (5.2)$$

Para a Hora:

$$\text{Hora sen} = \text{sen}\left(\frac{2\pi h}{24}\right) \text{ e } \text{Hora cós} = \text{cos}\left(\frac{2\pi h}{24}\right) \quad (5.3)$$

Visto que as variáveis de Entrada e Alvo se encontram na forma estandarizada, as Saídas, também se encontram na mesma forma. Assim, é necessário proceder à sua destandardização, utilizando para isso o processo inverso, transformando os valores na escala $[-1;1]$ em valores na escala real. Para este efeito, foi utilizada a expressão

$$v = \frac{v' - \min_A}{\max_A - \min_A} * (\max_a - \min_a) + \min_a \quad (5.4)$$

Capítulo 6

Previsão de Preços de Energia Eléctrica no Mercado Ibérico de Electricidade

No corrente capítulo será realizada a previsão de preços de energia eléctrica resultante do Mercado Diário Espanhol. Esta escolha foi feita tendo em consideração que o seu preço é menos afectado pelas condicionantes da capacidade de interligação entre Portugal e Espanha que, como foi referido anteriormente, quando esta se encontra no seu limite, faz variar os preços do mercado.

De modo a obter uma ANN de elevado desempenho é necessário analisar e comparar diferentes configurações de ANN. Em seguida, serão apresentadas as ANN treinadas e os seus valores de referência que originaram a escolha da ANN, a utilizar no estudo de previsão.

O objectivo de prever o preço de energia eléctrica, passa por permitir aos agentes de mercado realizar as suas ofertas de compra ou venda, de modo a que estas tenham maior possibilidade de serem aceites no mercado, rentabilizando assim as suas ofertas. Isto significa que, pode ocorrer manipulação do mercado caso haja um agente que possua uma boa ferramenta de previsão e que tenha poder de mercado suficiente para fazer subir ou descer os preços.

Esta actividade vai no entanto contra os princípios gerais do mercado de energia eléctrica. Em teoria, para um bom funcionamento do mercado, as ofertas devem ser colocadas ao seu custo marginal.

6.1 - ANN Treinadas

Este processo teve duas fases: a primeira correspondente à comparação de desempenho, que levou à escolha da ANN com o melhor desempenho e a segunda correspondente à realização do estudo de previsão utilizando a ANN escolhida anteriormente.

Durante esta fase, o indicador de performance utilizado foi o MSE, o erro médio quadrático e de modo a testar um número elevado de ANN. Para que fosse possível identificar a ANN com melhor performance, foi variado o número de entradas, assim como o número de neurónios na camada escondida (20, 10, 5, 3 e 2).

Do estudo realizado, apresentam-se aqui os sete conjuntos de variáveis que obtiveram os melhores resultados de performance. Foram atribuídas diferentes nomenclaturas aos conjuntos de variáveis, de modo a simplificar a escrita para posterior referência.

Tabela 6.1 - Nomenclatura das ANN e respectivas variáveis associadas.

Var 1	Ano, Mês, Dia-Semana (sen e cos), Hora (sen e cos), Feriado, Preço dia-2, Preço dia-3, Preço dia-4, Preço dia-5, Preço dia-6, Preço dia-7, Preço dia-8, Brent dia-2 e Brent dia-7
Var 2	Ano, Mês, Dia-Semana (sen e cos), Hora (sen e cos), Preço dia-2, Preço dia-3, Preço dia-4, Preço dia-5, Preço dia-6, Preço dia-7, Preço dia-8, Brent dia-2 e Brent dia-7
Var 3	Mês, Dia-Semana (sen e cos), Hora (sen e cos), Feriado, Preço dia-2, Preço dia-3, Preço dia-4, Preço dia-5, Preço dia-6, Preço dia-7, Preço dia-8, Brent dia-2 e Brent dia-7
Var 4	Mês, Dia-Semana (sen e cos), Hora (sen e cos), Preço dia-2, Preço dia-3, Preço dia-4, Preço dia-5, Preço dia-6, Preço dia-7, Preço dia-8, Brent dia-2 e Brent dia-7
Var 5	Ano, Mês, Dia-Semana (sen e cos), Hora (sen e cos), Feriado, Preço dia-2, Preço dia-3, Preço dia-7, Preço dia-8, Brent dia-2 e Brent dia-7
Var 6	Mês, Dia-Semana (sen e cos), Hora (sen e cos), Feriado, Preço dia-2, Preço dia-3, Preço dia-7, Preço dia-8, Brent dia-2 e Brent dia-7
Var 7	Mês, Dia-Semana (sen e cos), Hora (sen e cos), Feriado, Preço dia-2, Preço dia-3, Preço dia-4, Preço dia-5, Preço dia-6, Preço dia-7, Brent dia-2 e Brent dia-7

Os resultados da fase de teste das diversas ANN referidas são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Comparação entre diferentes ANN, usando o MSE.

	Nº neurónios na camada escondida	MSE Treino(10^{-2})	MSE Validação(10^{-2})	MSE Teste(10^{-2})
Var 1	20	1,325569	1,46615	1,48739
	10	1,38004	1,2874	1,45016
	5	1,32647	1,42133	1,42518
	3	1,47373	1,58692	1,76025
	2	1,63465	1,55158	1,75409
Var 2	20	1,381052	1,228768	1,31089
	10	1,31127	1,28835	1,35332
	5	1,55139	1,45778	1,71567
	3	1,42953	1,45669	1,53969
	2	1,54842	1,53225	1,52321
Var 3	20	1,31514	1,440943	1,358926
	10	1,33636	1,30871	1,33355
	5	1,54608	1,40465	1,50307
	3	1,47273	1,48284	1,44592
	2	1,57765	1,62574	1,63974
Var 4	20	1,279793	1,31173	1,321238
	10	1,22616	1,2446	1,32501
	5	1,36886	1,49843	1,45821
	3	1,19155	1,23736	1,17979
	2	1,52883	1,63521	1,51457
Var 5	20	1,332439	1,336824	1,43243
	10	1,34934	1,27009	1,3451
	5	1,43866	1,5475	1,37705
	3	1,65863	1,55433	1,72347
	2	1,68378	1,63996	1,64233
Var 6	20	1,421891	1,52563	1,444739
	10	1,27832	1,35089	1,33142
	5	1,46453	1,51022	1,6188
	3	1,66668	1,70723	1,72398
	2	1,6521	1,63228	1,74523
Var 7	20	1,356921	1,451519	1,480475
	10	1,27384	1,41562	1,3493
	5	1,3661	1,32475	1,32965
	3	1,39897	1,49751	1,46009
	2	1,5245	1,45722	1,5245

Analisando os resultados obtidos, escolheu-se a rede designada por Var 4 com 3 neurónios na camada escondida. A escolha baseou-se em dois princípios: valores mais baixos e mais equiparados entre os obtidos nos conjuntos de Treino, Validação e Teste.

Comparando alguns resultados, pode concluir-se que a utilização da variável Feriados não originou resultados positivos para esta previsão visto que, os valores obtidos por Var 3 estão distantes de Var 4, sendo a única diferença a introdução da variável Feriado nessa simulação.

De registar também o facto de a variável Ano não significar resultados positivos para a ANN, visto que, Var 1, Var 2 e Var 5 (onde foi considerado) apresentam de forma geral, valores piores do que os restantes.

Constata-se ainda que, dependendo das variáveis em utilização, existe variação em relação ao melhor número de neurónios da camada escondida a usar. Se os melhores resultados fossem obtidos pela Var 2, utilizar-se-iam 10 neurónios da camada escondida, sendo essa a razão de se terem realizado essas simulações.

Durante a realização das simulações, foi observado um fenómeno de *overfitting*, ou seja, a ANN adapta-se em demasia ao conjunto de treino, apresentando um baixo valor MSE para este conjunto, mas um valor elevado nos conjuntos de validação e de teste.

A evolução dos erros nos subconjuntos de treino, validação e teste durante as várias épocas em que foi treinada a rede é dada na Figura 6.1. Analisando esta figura constata-se que, os erros tendem rapidamente para um valor próximo do valor final, mantendo valores muito próximos entre si. A partir da época 17, os erros não sofreram mais alterações.

Na Figura 6.1 encontra-se representada a evolução dos erros dos subconjuntos de treino, validação e teste no tempo, em que a rede escolhida esteve a ser treinada.

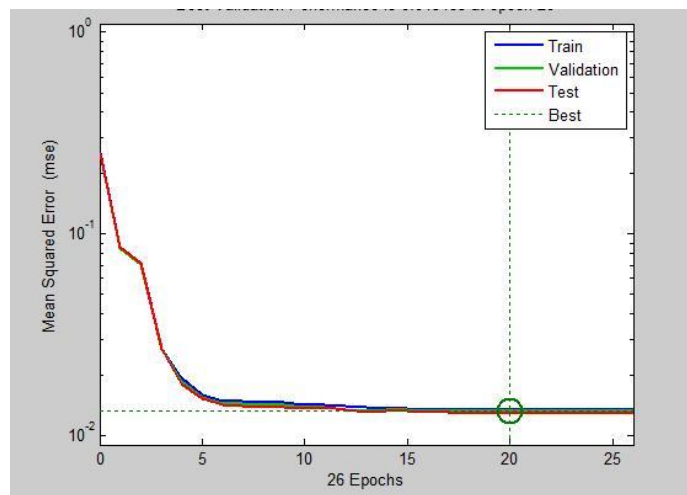


Figura 6.1 - Evolução dos erros no conjunto de treino, validação e teste no tempo.

6.2 - Tratamento de Feriados

Os feriados são por definição, dias oficiais em que não se trabalha devido à comemoração de uma determinada ocasião. Contemporaneamente o conceito de não se trabalhar nos feriados é vago, visto que em alguns sectores da sociedade se trabalha mesmo nesses dias, especialmente o comércio e algumas indústrias.

Os feriados são um factor que perturba a periodicidade semanal, visto que podem ser comparados a dias de fins-de-semana, no que diz respeito ao consumo e ao preço de energia eléctrica.

Assim, são considerados eventos atípicos nas séries de preços de energia eléctrica, visto que provocam efeitos negativos na performance da previsão. Esses efeitos ocorrem tanto no dia do feriado, como também nos dias seguintes que dependem dos seus valores. Por um lado, as previsões em dias feriados, têm tendência a erros por excesso, visto o consumo ser bastante mais baixo do que o que se esperava; por outro, as previsões dos dias que se seguem, que utilizam os valores do dia feriado têm tendência para adoptarem erros por defeito, ou seja, valores mais baixos do que deveriam.

De modo a resolver este problema, foi previamente testada a implementação de uma variável Feriados como entrada da ANN, porém os seus resultados não foram os melhores, e assim sendo, não foi adoptada essa variável como entrada da rede escolhida para esta previsão.

Então optou-se por uma abordagem no seguimento da ANN, ou seja, tentar melhorar os resultados obtidos [31].

No período compreendido no conjunto de teste, existem 3 feriados, 10 e 12 de Abril e o 25 de Abril. Estes feriados têm particularidades diferentes. Os dias 10 e 12 de Abril correspondem aos feriados da Páscoa, Sexta Feira Santa e Domingo, respectivamente e são festejados em Espanha e Portugal, enquanto o dia 25 de Abril é festejado só em Portugal.

Para o tratamento dos feriados, optou-se por fazer uma comparação da alteração provocada por estes mesmos feriados no ano anterior, comparando-o com o mesmo período em 2008.

Visto que os feriados referentes à Páscoa são feriados móveis, é necessário fazer a correspondência entre os dias 10 e 12 de Abril de 2009 com os dias 21 e 23 de Março de 2008 (período homólogo do ano anterior).

De forma a analisar-se a influência destes feriados foi feita uma comparação entre os dias 21 e 23 de Março de 2008 com os dias 14 e 16 do mesmo mês, de forma a respeitar-se a periodicidade semanal do preço de energia eléctrica. Porém, esta análise não contempla a variação normal da série temporal entre duas semanas distintas, a variação entre os dias 14 e 21 de Março de 2008, não é só consequência do feriado, mas também tem intrinsecamente um valor associado à variação do preço dessas semanas.

Assim, foi efectuada uma média do preço de energia eléctrica entre os dias 10 e 13 de Março de 2008 e comparada com o mesmo preço entre os dias 17 e 20 de Março de 2008. A variação relativa de preços entre estas semanas foi de 1,66% (valor positivo significa um aumento).

Foi também calculada a variação relativa (Δ_{dia}) entre os dias 14 e 21 de Março, tendo esse valor sido registado por hora, de modo a ser mais preciso, obtendo assim 24 variações de feriado ($\Delta_{Feriado}$), correspondendo às 24 horas de cada dia.

A partir destes valores, podemos chegar ao aumento relativo correspondente para o feriado de 21 de Março utilizando a seguinte formula:

$$\Delta_{dia} = \Delta_{Feriado} + \Delta_{semanal} \quad \leftrightarrow \quad \Delta_{Feriado} = \Delta_{dia} - \Delta_{semanal} \quad (6.1)$$

Como a nossa série temporal lida com valores horários, foi efectuada o cálculo acima referido para cada hora. A diminuição média relativa foi de 12,37%.

Com estes cálculos, obteve-se valores de variação que se consideram estarem atribuídos à variação própria do dia feriado correspondente à Sexta-Feira de Páscoa e assim, adopta-se esses valores de modo a aplica-los ao respectivo dia da previsão. Assim, cada preço de hora do dia 10 de Abril de 2009 será multiplicado pela respectiva variação que foi calculada.

Para o feriado Domingo de Páscoa foi adoptada a mesma fórmula de cálculo, tendo sido necessário analisar a variação relativa entre os dias 16 e 23 de Março de 2008. O aumento diário relativo entre o domingo 16 de Março de 2008 e o domingo 23 de Março de 2008 foi de 0,03%; logo considerou-se que este feriado, provavelmente por ser domingo, não tem influência no preço de energia eléctrica, mantendo-se assim os valores obtidos pela ANN.

O mesmo trabalho foi realizado para o dia 25 de Abril de 2009. Foi analisada a variação semanal relativa entre os dias 14 a 17 de Abril de 2008 e os dias 21 a 24 de Abril de 2008, tendo sido obtida uma redução de 2,14%. Em seguida, avaliou-se a variação relativa entre os dias 18 de Abril de 2008 e 25 de Abril de 2008, de onde resultou um valor diário algo estranho de um aumento de 3,35%. Assim os considerandos iniciais onde se suponha que os feriados são eventos atípicos numa série temporal, são contrariados e portanto não se adoptou a metodologia de tratamento de feriados para este caso. Supõem-se que uma possível causa para esta situação pode passar pela característica unicamente portuguesa deste feriado, porem isso seria admissível no caso de ter ocorrido uma ligeira diminuição do preço, o que significaria que pouca influência teria o feriado em Portugal. Neste caso, sucede-se um aumento relativo de mais de 5% para este feriado.

Por outro lado, a diminuição típica do preço de energia eléctrica nos feriados, influenciam as previsões para os dias cuja previsão depende dos dados do dia feriado. Assim poderia ser efectuada um tratamento de modo a melhorar o desempenho da previsão para dias que se seguem a feriados.

Este tratamento poderia ser efectuado de duas formas:

- Substituir os valores reais do preço de energia eléctrica desse dia, quando representam a Entrada Preço de Energia para o dia n-x, pelos valores obtidos pela previsão tratada;
- Fazer um tratamento inverso ao efectuado para os dias feriados, para os dias após feriados, onde se retirasse a componente de variação do feriado obtida pela previsão.

Porém considerou-se que não existia necessidade de efectuar o referido tratamento, tendo em consideração que a ANN escolhida tem 7 variáveis de entrada relativas ao Preço de Energia Eléctrica, podendo ser assim mais facilmente mascarada a influência dos feriados.

À semelhança da alteração provocada nos preços de energia eléctrica por um dia feriado, um preço que se afasta da gama esperada também poderá ter consequências nos preços de energia eléctrica futuros que dependam dele. Assim, e pela análise da Figura 6.10 pode-se afirmar que estes valores excepcionais pouco influenciam as previsões futuras.

Os resultados obtidos para os valores médios do MAPE para os dias seguintes ao feriado tratado (10 de Abril) apontam no sentido de não ser necessário proceder ao tratamento para dias após feriados. Na semana de 11 a 17 de Abril, os valores do MAPE situam-se dentro dos valores médios esperados, tendo inclusive, a estimativa para o dia 17 de Abril, que corresponde a uma semana após o feriado, um valor do MAPE baixo de 5,42%.

6.3 - Resultados

Os resultados que se apresentam em seguida foram obtidos pela rede Var 4 com 3 neurónios na camada escondida, que como foi dito anteriormente foi a rede simulada que apresentou os menores valores de MSE, sendo esse o factor de escolha da rede.

Também referido anteriormente, o conjunto de teste, ao qual são atribuídos estes resultados são referentes ao período compreendido entre o dia 1 de Março de 2009 e o dia 30 de Abril de 2009. Neste período de realçar, a existência de três feriados: 10 e 12 de Abril (Páscoa) e 25 de Abril, 6^a feira, domingo e sábado respectivamente.

6.3.1 - Resultados Obtidos para Dias Úteis

Em seguida são apresentados resultados demonstrativos da performance da ANN para os dias úteis. De realçar que, apesar de ainda se manter o desenho atrás mencionado correspondente ao diagrama de carga típico de dias úteis, poderemos ver que os picos, e os baixos, estão muito próximos, em relação ao que acontecia há alguns meses atrás. Isto significou que, apesar de se ter detectado também uma baixa dos preços de energia eléctrica nas horas de vazio, essa redução foi maior nas horas de ponta.

Se recuarmos um ano, a relação entre as horas de vazio e de ponta cifrava-se sensivelmente no dobro, enquanto agora se encontra em metade.

Assim apresenta-se uma figura ilustrativa da previsão para cada dia útil, apresentando alguns dos melhores resultados mas não só, de modo a se poder discutir eventuais falhas (de cariz interno ou externo) ou possíveis melhorias à rede em estudo.

Os dias escolhidos foram:

- 2ª Feira, 16 de Março de 2009
- 3ª Feira, 21 de Abril de 2009
- 4ª Feira, 18 de Março de 2009
- 5ª Feira, 5 de Março de 2009
- 6ª Feira, 17 de Abril de 2009

Estão ilustrados nas Figuras 6.2 a 6.6 os resultados obtidos pela ANN para dias úteis em diversos dias. Como é possível analisar, os resultados são positivos, havendo uma elevada performance por parte da ANN seleccionada, à excepção dos resultados da figura 6.6.

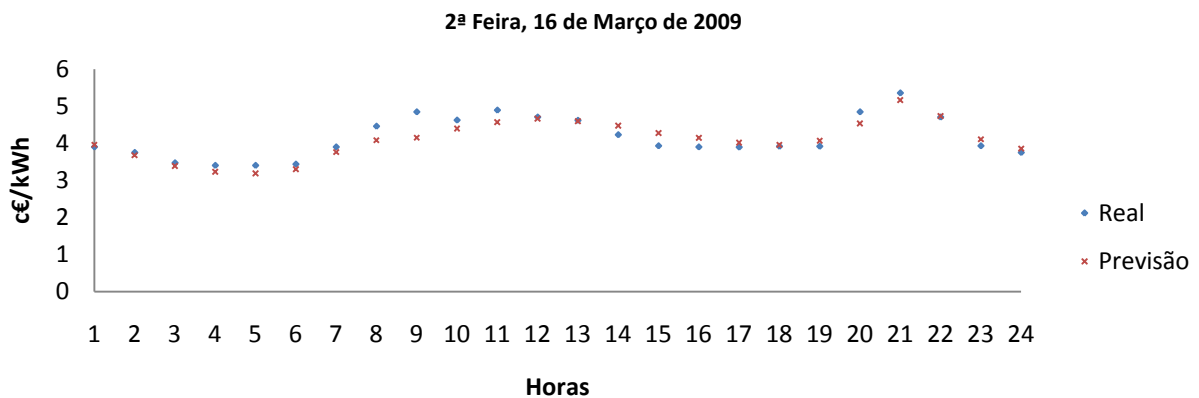


Figura 6.2 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para segunda-feira, dia 16 de Março de 2009.

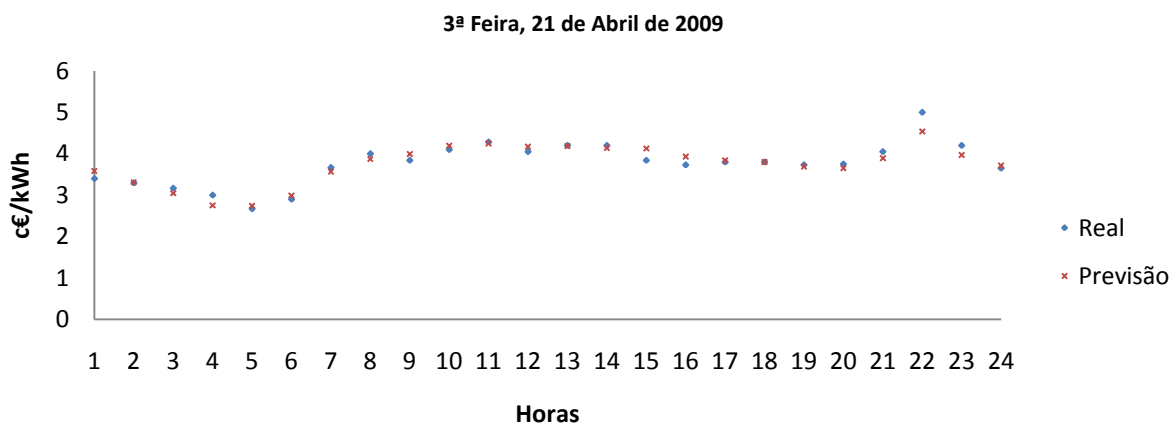


Figura 6.3 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para quarta-feira, dia 21 de Abril de 2009.

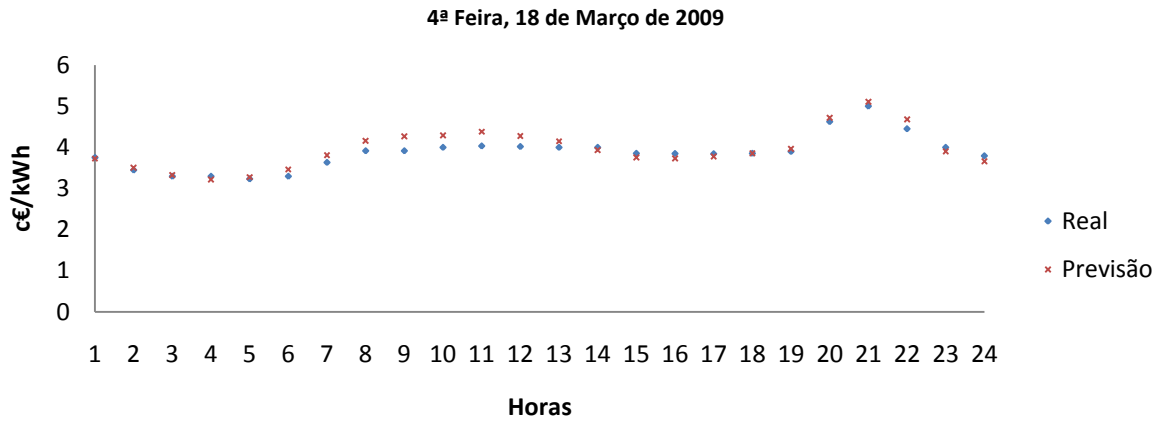


Figura 6.4 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para quarta-feira, dia 18 de Março de 2009.

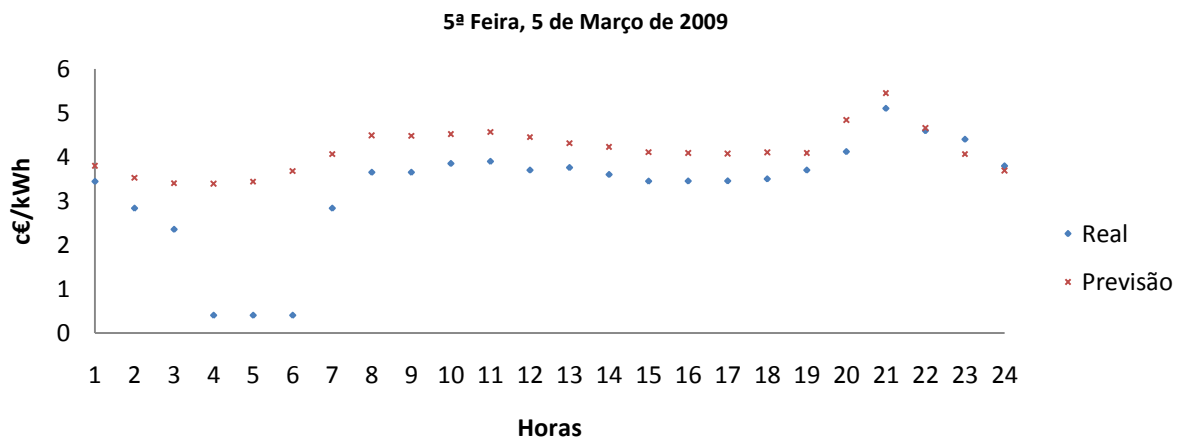


Figura 6.5 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para quinta-feira, dia 5 de Março de 2009.

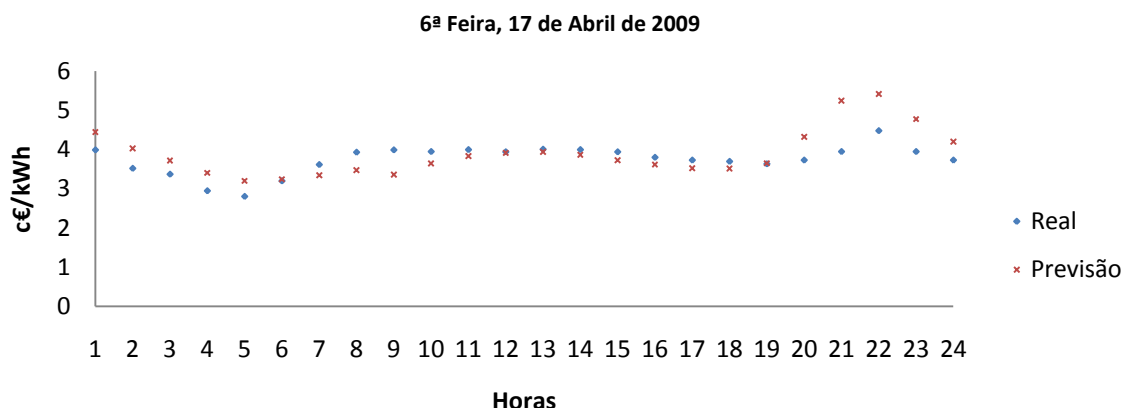


Figura 6.6 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para sexta-feira, dia 17 Abril de 2009.

O valor médio do MAPE obtido para dias úteis foi de 7,87%. Este valor foi fortemente afectado pelo dia 5 de Março de 2009, em cima referido. Caso se retirasse este dia, o valor médio do MAPE seria de 7,30%. Porém o efeito deste dia, teve repercussão nas previsões seguintes sendo possível que, o erro médio ainda fosse mais baixo.

No dia 5 de Março acima referido (Figura 6.5), o preço de mercado sofreu uma alteração atípica nas primeiras horas, onde o seu valor foi de 0,4c€/kWh às 4, 5 e 6 horas. Este facto originou que o erro médio deste dia se encontre em 33,90%, afectando fortemente os resultados globais.

6.3.2 - Resultados Obtidos para Fins-de-Semana

Tal como já foi referido anteriormente, a evolução do preço de energia eléctrica a sua evolução em dias de fim-de-semana é bastante diferente quando comparada com os dias úteis. Este facto, implica que a ANN necessita de interpretar um padrão diferente consoante o dia em questão.

Em seguida são apresentados, como exemplos ilustrativos da performance da ANN os resultados obtidos para os dias 25 de Abril e 19 de Abril de 2009, respectivamente Sábado e Domingo. De salientar o facto de, como foi referido anteriormente, o dia 25 de Abril ser um feriado em Portugal, e a ANN continuar a apresentar um desempenho positivo.

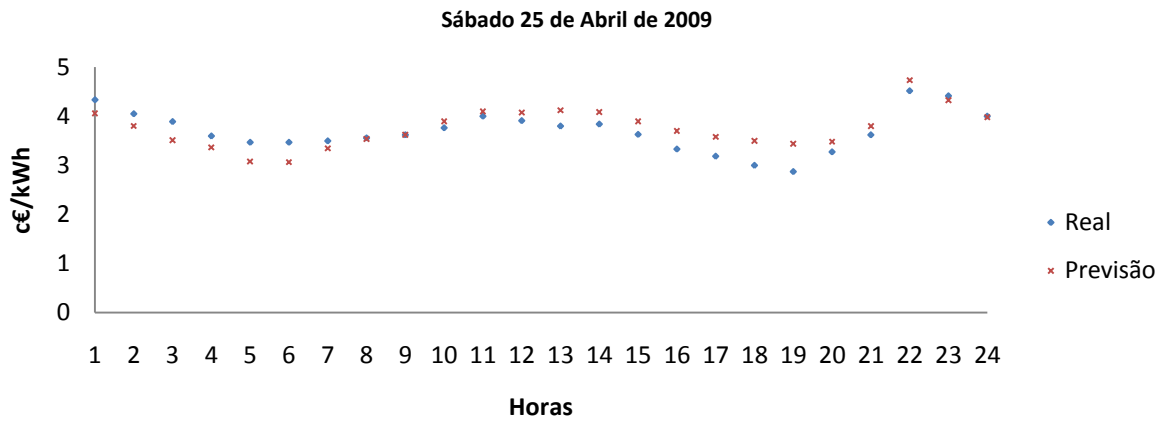


Figura 6.7 - Preço de Energia eléctrica real, e respectiva previsão para Sábado, dia 25 Abril de 2009.

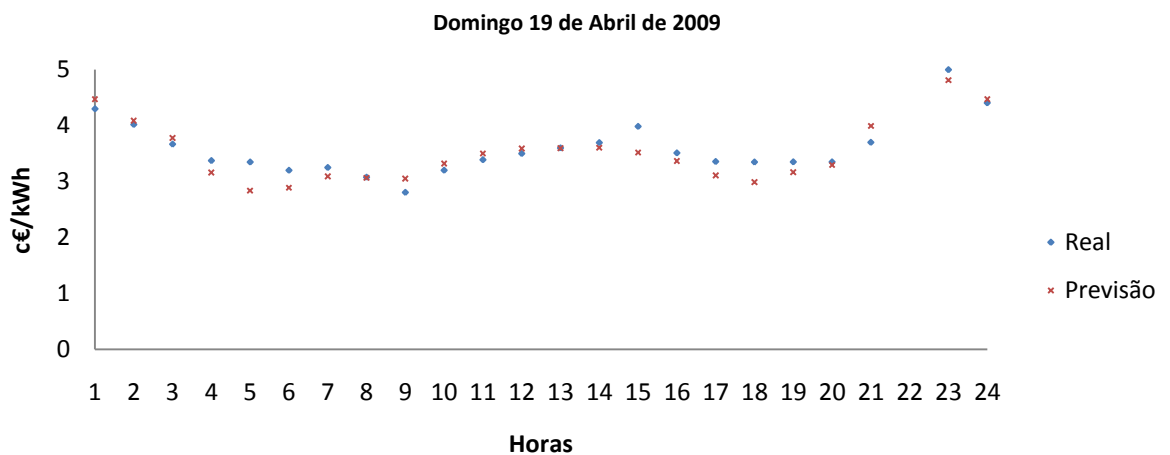


Figura 6.8 - Preço de energia eléctrica real, e respectiva previsão para Domingo, dia 19 Abril de 2009.

O valor médio do MAPE obtido para dias de fins-de-semana foi 9,51%, valor que comparando com o MAPE médio em dias úteis é superior, tal como seria de esperar. Esta diferença, que é comum neste tipo de estudo, pode ser explicada pela diferença de dias úteis e dias de fim-de-semana em estudo, ou seja, o maior número de exemplos submetidos ao treino de dias úteis provoca um melhor desempenho por parte da ANN para esses dias.

6.3.3 - Resultados Obtidos para Dias Feriados

De modo a ilustrar o desempenho do tratamento de feriados está representado na Figura 6.9 o valor real, a previsão e a previsão após o tratamento de feriados para o dia 10 de Abril de 2009.

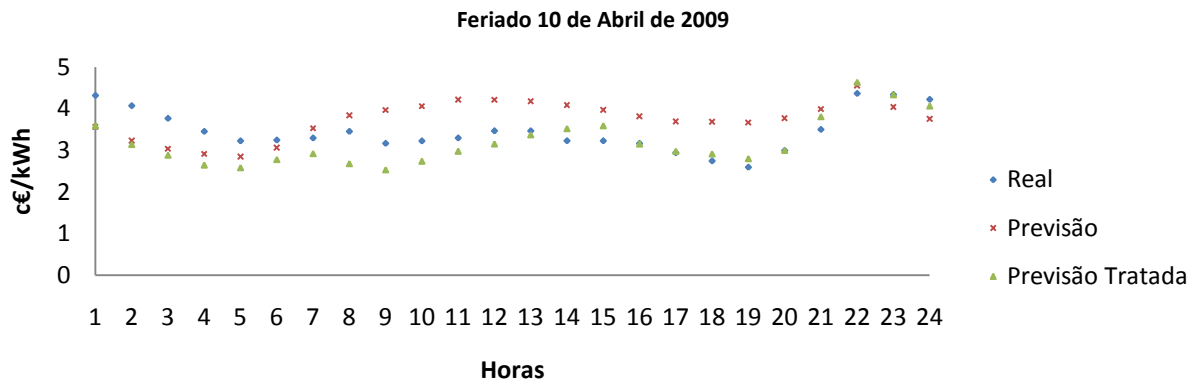


Figura 6.9 - Preço de Energia eléctrica real, respectiva previsão e previsão após o tratamento de feriados para sexta-feira, dia 10 de Abril de 2009.

Como é possível visualizar, o efeito do tratamento de feriados é aceitável, melhorando a performance da previsão consideravelmente, visto que do valor inicial do MAPE de 17,96% se passou para 11,89%, valor que já é bastante aceitável. Este resultado torna aceitável a realização deste processo e é especialmente aconselhado para feriados que ocorrem em dias úteis e que sejam festejados em ambos os países.

6.3.4 - Resultados Globais

Em termos globais, o valor do MAPE da ANN obtido foi de 8,40%. Este estudo ocorre num período com um contexto económico mundial conturbado, que originou uma elevada diminuição do preço de energia eléctrica. Esta diminuição originou consequentemente uma alteração no diagrama de cargas habitual, tendo-se esbatido a diferença entre os preços de vazio e de ponta. Estes acontecimentos provocam na ANN algumas dificuldades e, portanto, pode-se esperar que se esta ANN fosse inserida noutra contexto histórico, poderia revelar melhores desempenhos do que o que os actuais resultados demonstram.

Tabela 6.3 - Valores médios do MAPE por dia durante os meses de Março e Abril de 2009.

Dia	Março		Abril	
1	Dom	5,9352%	Qua	4,0571%
2	Seg	8,4757%	Qui	6,9244%
3	Ter	5,1605%	Sex	8,3017%
4	Qua	13,0803%	Sab	6,2686%
5	Qui	32,1989%	Dom	4,5451%
6	Sex	7,1598%	Seg	5,5868%
7	Sab	11,4448%	Ter	8,8816%
8	Dom	8,1365%	Qua	12,2341%
9	Seg	7,1880%	Qui	11,5294%
10	Ter	8,4357%	Sex*	11,8871%
11	Qua	7,7537%	Sab	12,8621%
12	Qui	3,9353%	Dom*	13,9600%
13	Sex	6,2430%	Seg	4,6564%
14	Sab	12,0033%	Ter	10,4526%
15	Dom	4,3235%	Qua	8,7429%
16	Seg	4,2712%	Qui	8,1764%
17	Ter	3,9709%	Sex	5,4161%
18	Qua	3,4701%	Sab	14,5506%
19	Qui	5,3232%	Dom	9,0714%
20	Sex	5,8448%	Seg	7,9554%
21	Sab	8,4200%	Ter	3,8168%
22	Dom	16,5006%	Qua	7,2339%
23	Seg	6,6340%	Qui	9,0410%
24	Ter	9,0706%	Sex	11,5667%
25	Qua	4,8848%	Sab*	5,2373%
26	Qui	9,5294%	Dom	7,7099%
27	Sex	7,4412%	Seg	8,4588%
28	Sab	7,0251%	Ter	9,2919%
29	Dom	13,7417%	Qua	8,8508%
30	Seg	6,7839%	Qui	4,4738%
31	Ter	6,2069%		

* Significa que esse dia é feriado

Analisando mais detalhadamente o mês de Março denota-se alguns valores de MAPE na ordem das dezenas. Assim com vista a compreender o funcionamento do mercado, foi analisado o gráfico comparativo da variação do Preço de Energia Eléctrica Real, com a Previsão, ilustrado na Figura 6.10.

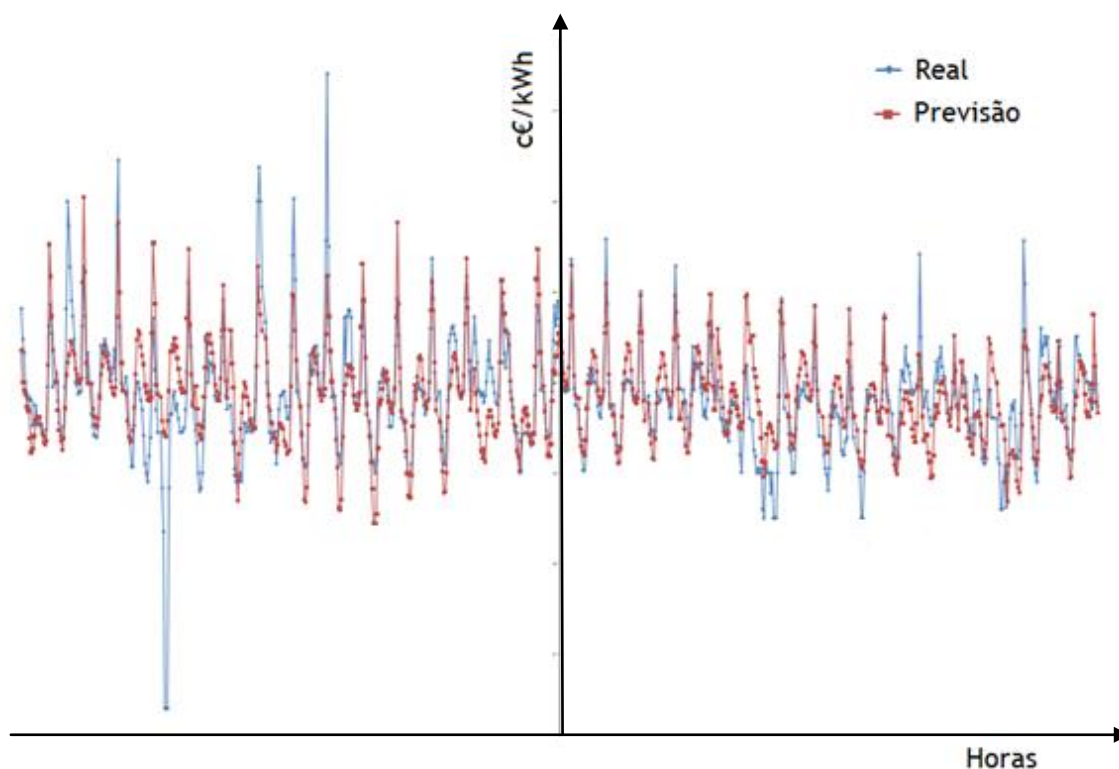


Figura 6.10 - Variação do Preço de Energia Eléctrica real e respectiva previsão para o mês de Março de 2009.

Como se pode analisar, existe uma diferença acentuada, entre o que seria expectável, caso a série temporal seguisse uma ordem constante e o que realmente se sucede.

É possível visualizar que o efeito de alguns valores reais excepcionais, (a azul na Figura 6.10) na estimação de valores seguintes, é pouco relevante, não originando assim diferenças significativas nas previsões (a vermelho na Figura 6.10).

De modo a desenvolver o estudo da comparação da previsão do preço de energia eléctrica com o seu valor real, foi necessária a standardização e conjugação das variáveis Hora e Dia. Por este factor, o eixo do preço de energia eléctrica aparece no meio.

Registe-se por fim, que a segunda quinzena do mês de Março foi mais constante, no que diz respeito ao Preço de Energia Eléctrica, o que implicou uma performance mais eficiente da ANN.

A Tabela 6.4 ilustra os valores médios do MAPE por hora durante os meses de Março e Abril.

Tabela 6.4 - Valores médios do MAPE por hora.

Hora	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h
MAPE	7,4675%	7,8654%	8,6114%	12,7904%	13,1445%	11,0963%	7,0567%	8,9455%
Hora	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h
MAPE	10,2063%	8,7638%	8,7905%	8,1294%	7,3999%	7,1608%	6,9345%	7,2119%
Hora	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	24h
MAPE	7,8231%	8,6287%	6,7997%	6,8764%	8,5629%	8,2244%	6,6582%	6,5024%

Foi analisado o MAPE médio por hora, de forma a verificar se a ANN prevê correctamente o preço de energia eléctrica, ou se mostrou dificuldades em algum período horário.

Perante a visualização dos dados da Tabela 6.4 pode-se afirmar a capacidade que a ANN tem para assimilar os diferentes períodos é boa, especialmente durante a noite.

No período entre as 4 e 6 horas foi detectado um padrão mais elevado para o valor médio do MAPE.

Capítulo 7

Síntese, Conclusão e Trabalho Futuro

O desenvolvimento deste estudo envolveu informação de assuntos abrangentes, como a reestruturação de mercados de electricidade, bem como aspectos específicos relativos à estimação de preços da energia eléctrica.

Foi analisada a reestruturação do sector eléctrico no Chile e registado o seu carácter pioneiro no âmbito do movimento global de reestruturação do sector eléctrico.

Quanto à reforma levada a cabo na Europa, anos mais tarde, foi objecto de estudo a dificuldade de implementação das Directivas Europeias nos diversos Estados-Membros. Mais concretamente, foi avaliada a implementação do MIBEL e as alterações legislativas levadas a cabo em Portugal e Espanha para a concretização deste mercado. Ainda relativamente a este tema, uma das principais alterações deu-se pela necessidade de pôr cobro aos CAE de modo a permitir a venda de energia produzida pelos produtores no mercado. De modo a ressarcir as empresas produtoras pela alteração verificada, foi criado um mecanismo de compensação denominado CMEC.

No panorama Europeu, merecem destaque os mercados até agora criados, a intenção da criação de novos mercados e de tornar os existentes mais abrangentes. Para tal, a capacidade de transporte das linhas de interligação é um factor determinante na melhoria do desempenho dos mercados.

No âmbito do MIBEL foi ainda analisado o modelo em vigor, as entidades responsáveis pelo correcto funcionamento e a capacidade de interligação entre Portugal e Espanha. Neste último ponto, salientou-se a necessidade de aumentar a capacidade de interligação entre existente, já que o fenómeno de *Market-Splitting* sucedeu em 5421 períodos horários do ano de 2008, correspondendo a 61,7% do seu total. Esta situação originou um aumento do preço médio de mercado de electricidade de 8,6% em Portugal relativamente a Espanha.

Concluiu-se ainda, que a ANN é o método mais consensualmente aconselhado para a realização de previsão de séries de preços do mercado de electricidade, apresentando as diversas vantagens, em relação a outros métodos.

Sobre as ANN, foi efectuado um estudo que contemplou os seus fundamentos históricos, assim como aspectos de modelização e os seus processos de aprendizagem. Especificou-se ainda a arquitectura de rede e a escolha do *software* utilizado.

Os dados utilizados nos conjuntos de treino e de teste correspondem ao período de 1 ano e 4 meses, tendo-se iniciado em Janeiro de 2008. De entre eles os últimos dois meses foram escolhidos como conjunto de treino.

Estes dados, apresentam valores incaracterísticos devido à actual conjuntura económica, que poderá representar um pior desempenho da rede escolhida. Como foi referido no período em foco neste estudo, tanto o preço, como o consumo de energia eléctrica tiveram quedas acentuadas.

O treino da rede neuronal contemplou o estudo de diferentes arquitecturas de redes que agrupavam diversos conjuntos de variáveis de entrada, assim como diferentes números neurónios na camada escondida, de modo a ser identificada a rede com o melhor desempenho para a previsão a realizar neste trabalho.

De salientar ainda, a importância da standardização das Entradas e Alvos e posterior destandardização das Saídas, de forma a promover a equalização das escalas das variáveis.

Concluiu-se que o tratamento de feriados, posterior à obtenção de resultados da ANN, pode permitir obter uma melhoria considerável de resultados. Este processo centrou-se na descoberta da variação do preço do mercado por efeito do feriado, no seu período homólogo do ano anterior, comparando o seu valor com o obtido uma semana antes. Posteriormente procedeu-se à aplicação dessa mesma variação ao feriado em questão. De salientar que esta abordagem retira o efeito da variação do preço de mercado dessa semana tentando, assim, identificar o real valor da variação correspondente ao feriado.

Por fim, realçam-se os resultados obtidos. O valor obtido para o MAPE para dias úteis foi de 7,87% e para dias de fim-de-semana e feriados foi de 9,64% o que resultou num valor global de 8,40%. Estes valores podem ser considerados positivos, especialmente tendo em conta as variações de consumo e preço ocorridas no mercado de electricidade no último ano.

O processo de tratamento de feriados também se revelou positivo, uma vez que o valor do MAPE obtido para o feriado 10 de Março passou de 17,96% para 11,89%.

Tendo em conta os resultados obtidos neste estudo, pensa-se ser relevante um estudo mais abrangente do tratamento de feriados adoptado, alargando o seu estudo a um maior número de casos, e analisando o efeito da sua variação nos últimos dois a três anos. Recomenda-se também a análise da influência dos diferentes tipos de feriados no preço de energia eléctrica do MIBEL, uma vez que, este contempla uma vasta área geográfica, com variadas diferenças culturais e regionais.

Referências

1. Ventosa, M., et al., *Electricity market modeling trends*. Energy Policy, 2005. **33**(7): p. 897-913.
2. Nanduri, V. and T.K. Das, *A survey of critical research areas in the energy segment of restructured electric power markets*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2009. **31**(5): p. 181-191.
3. Rudnick, H. and J. Zolezzi, *Electric sector deregulation and restructuring in Latin America: Lessons to be learnt and possible ways forward*. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2001. **148**(2): p. 180-184.
4. Saraiva, J.P.T., J.L.P.P.d. Silva, and M.T.P.d. Leão, *Mercados de electricidade regulação e tarifação de uso das redes*. Colecção Manuais 6. 2002, Porto: FEUP Edições. 293.
5. Ferrari, A. and M. Giulietti, *Competition in electricity markets: International experience and the case of Italy*. Utilities Policy, 2005. **13**(3): p. 247-255.
6. Schwarz, J., et al., *Overview of the EU electricity directive*. IEEE Power Engineering Review, 2000. **20**(4): p. 4-7.
7. Europeia, C., *Directiva 2003/54/CE*. 2003.
8. Europeia, C., *Terceiro Pacote Legislativo da Energia*. 2007.
9. Ferreira, P., M. Araújo, and M.E.J. O'Kelly, *An overview of the Portuguese electricity market*. Energy Policy, 2007. **35**(3): p. 1967-1977.
10. Domínguez, E.F. and J.X. Bernat, *Restructuring and generation of electrical energy in the Iberian Peninsula*. Energy Policy, 2007. **35**(10): p. 5117-5129.
11. Miranda, R., *Towards a pan-European electricity market*. 2006.
12. Loschel, A., U. Moslener, and D.T.G. Rubbelke, *Indicators of energy security in industrialised countries*. Energy Policy, 2009.
13. Santana, J., *A Concorrência no sector eléctrico*. 2006: ERSE.
14. Borges, J. *MIBEL and the market splitting - 5th International Conference on the European Electricity Market*. in *2008 5th International Conference on the European Electricity Market, EEM*. 2008.
15. Barquilha, J. *Energy auctions for regulated demand in the Iberian market: A proposal*. in *2008 5th International Conference on the European Electricity Market, EEM*. 2008.
16. García-Díaz, A. and P.L. Marín, *Strategic bidding in electricity pools with short-lived bids: An application to the Spanish market*. International Journal of Industrial Organization, 2003. **21**(2): p. 201-222.
17. Arroyo, J.M. and A.J. Conejo, *Multiperiod auction for a pool-based electricity market*. IEEE Transactions on Power Systems, 2002. **17**(4): p. 1225-1231.
18. E.R.S.E., *Manual de Procedimentos do Gestor do Sistema*. 2008. p. 98.
19. Ho, S.L., M. Xie, and T.N. Goh, *A comparative study of neural network and Box-Jenkins ARIMA modeling in time series prediction*. Computers and Industrial Engineering, 2002. **42**(2-4): p. 371-375.

20. Jeyasurya, B. *Power system performance enhancement using computational swarm intelligence*. in *2008 IEEE Electrical Power and Energy Conference - Energy Innovation*. 2008.
21. Kim, K.-H., et al., *Implementation of hybrid short-term load forecasting system using artificial neural networks and fuzzy expert systems*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995. **10**(3): p. 1534-1539.
22. Malliaris, M. and L. Salchenberger, *A neural network model for estimating option prices*. *Applied Intelligence*, 1993. **3**(3): p. 193-206.
23. Guo, J.J. and P.B. Luh, *Improving market clearing price prediction by using a committee machine of neural networks*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004. **19**(4): p. 1867-1876.
24. Szkuta, B.R., *Electricity price short-term forecasting using artificial neural networks*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999. **14**(3): p. 851-857.
25. Zhang, L., P.B. Luh, and K. Kasiviswanathan, *Energy clearing price prediction and confidence interval estimation with cascaded neural networks*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003. **18**(1): p. 99-105.
26. Zhang, L. and P.B. Luh, *Neural network-based market clearing price prediction and confidence interval estimation with an improved extended Kalman filter method*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005. **20**(1): p. 59-66.
27. Lippmann, R.P., *INTRODUCTION TO COMPUTING WITH NEURAL NETS*. *IEEE ASSP magazine*, 1987. **4**(2): p. 4-22.
28. Ermis, K., et al., *Artificial neural network analysis of world green energy use*. *Energy Policy*, 2007. **35**(3): p. 1731-1743.
29. Pino, R., et al., *Forecasting next-day price of electricity in the Spanish energy market using artificial neural networks*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2008. **21**(1): p. 53-62.
30. Hush, D.R., *Classification with neural networks: a performance analysis.*, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Engineering*. 1989: Dayton, Ohio.
31. Duarte, A., J.T. Saraiva, and J.M. Fidalgo, *Previsão de Preços de Energia Eléctrica em Mercados de Electricidade - Horizonte de 1 Semana*. 2008.