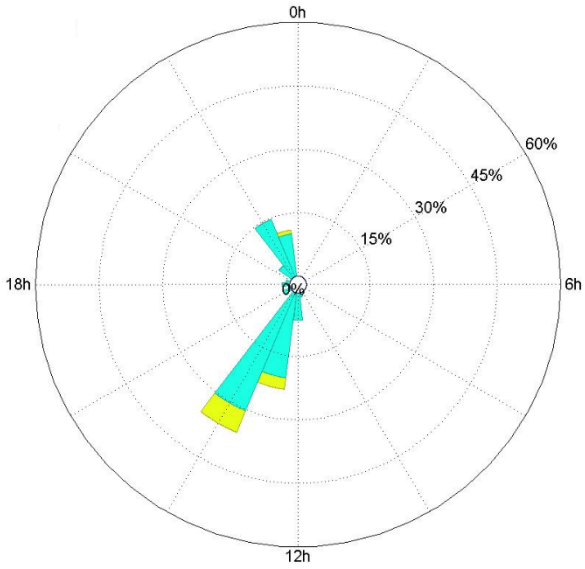
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Modelação de mercados de energia elétrica com recurso a métodos de estatística circular

DANIEL TOMÉ DE FREITAS
(Licenciado)

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

Orientadores:
Professor João Hermínio Ninitas Lagarto
Professora Ana Alexandra Antunes Figueiredo Martins

Júri:
Presidente: Professor José Manuel Prista do Valle Cardoso Igreja
Vogais:
Professor João Hermínio Ninitas Lagarto
Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Outubro de 2016

Agradecimentos

Aproveito a oportunidade para agradecer aos meus pais, João Freitas e Maria do Céu Tomé, por todo o apoio que me deram ao longo do meu ciclo de estudos.

Aos orientadores, professor João Lagarto e professora Ana Martins, pela disponibilidade que sempre demonstraram para reunir e discutir todas as decisões no desenvolvimento do trabalho. O conhecimento, experiência e assertividade de ambos foi fundamental para o resultado final desta dissertação.

Finalmente agradeço a todos os amigos, colegas e professores que conheci no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Resumo

Numa economia de mercado, o preço dos bens transacionados, está intimamente ligado, à lei da oferta e da procura. A energia elétrica tem caraterísticas que dificultam o seu de armazenamento, tornando necessária a produção simultânea com o consumo. Assim, surge a necessidade de os diversos agentes do mercado conhecerem o seu comportamento e as variáveis que o influenciam, de forma a tomar decisões corretas em cada momento. Nos mercados de energia elétrica ocorrem fenómenos que se repetem ao longo de ciclos temporais, como por exemplo situações em que o preço da energia atinge valores extremos.

Neste trabalho são modelados comportamentos de mercado e estudados fatores que influenciam a hora em que ocorrem os valores máximos diários, utilizando métodos de estatística circular. Foram criados gráficos circulares, para pesquisar e identificar padrões de comportamento que ocorrem ciclicamente. Foram aplicados métodos de estatística circular descritiva, para calcular medidas de localização central e dispersão, e verificado se os dados seguem uma distribuição uniforme e Von Mises. Foram calculadas percentagens de concordância entre os preços máximos diário e dados de procura e produção de energia elétrica. Na primeira fase do trabalho, foi analisado o valor e a frequência da hora em que é atingido o preço máximo da energia elétrica, no Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL), no 1ºs e 3ºs trimestres entre 2007 e 2014. Na segunda fase, estudou-se o valor e a frequência da hora em que é atingida a quantidade máxima diária de procura, e de produção de energia elétrica, nas diferentes tecnologias de produção e comparou-se com os dados dos preços máximos diários.

Os resultados revelam que o mercado português e espanhol funcionam integrados, com comportamentos semelhantes. A hora em que é atingido o preço máximo diário da energia elétrica no MIBEL, varia com a estação do ano, influenciada pela procura. Em Portugal as centrais a carvão posicionam-se como tecnologia de base. Os agentes com tecnologia de produção hídrica aproveitam as horas de maior procura e de preços mais elevados, para produzir energia e maximizar o lucro. O desenvolvimento deste estudo deu origem ao artigo científico *Modeling of cyclic events in electricity markets using circular statistical methods* apresentado na conferência *13th European Energy Market 2016*.

Palavras-chave: estatística circular, gráficos circulares, MIBEL, preços máximos diários, produção de energia elétrica

Abstract

In a market economy, the price of the traded goods is strongly related to the law of supply and demand. Electrical energy has characteristics that make it difficult to store, and thus it is required to generate energy simultaneously with consumption. Hence, there is a need for every market agents to understand the market behavior and the variables that can influence it to be able to make the right decisions at every moment. In the electrical energy markets, some events happen repeatedly in temporal cycles, for instances when prices achieve extreme values.

This paper models the market behaviors to analyze the factors that influence the specific hours, which has achieved a higher daily price, using circular statistical methods. Circular graphs were constructed to examine and identify the cyclical behavioral patterns. Descriptive circular statistic methods were utilized to calculate measures of central location and dispersion, and assess whether the data followed the circular uniform distribution or Von Mises distribution. Percent agreement between higher daily prices and electrical production and demand data was then calculated. Firstly, the value and the frequency of the hour when higher daily prices of the electrical energy are achieved in the Iberian Electricity Market (MIBEL) were analyzed during the 1st and 3th quarter, from 2007 to 2014. Secondly, the frequency of the hour when higher daily demand and production of electrical energy for different technologies are achieved was examined and compared with the higher daily prices data.

Results show that the Portuguese and Spanish markets are integrated and have identical behavior. The hour when the higher daily price of the transacted electrical energy in MIBEL is achieved, varies according to the seasons of the year, as influenced by the demand. In Portugal, coal power plants assume the role of base technology. Agents with hydroelectric power plants avail the hours of higher demand and higher prices to produce energy and maximize the profits. This study was used to create the paper Modeling of cyclic events in electricity markets using circular statistical methods that was presented in the 13th European Energy Market 2016 conference.

Keywords: circular statistic, circular graphs, electrical energy production, higher daily prices, MIBEL

Índice de Conteúdos

Agradecimentos ..... **iii**

Resumo ..... **v**

Abstract ..... **vii**

Índice de Conteúdos ..... **ix**

Índice de Tabelas ..... **xiii**

Índice de Figuras ..... **xv**

Lista de Acrónimos ..... **xix**

Lista de Símbolos ..... **xxiii**

Capítulo 1 – Introdução **1**

1.1 Enquadramento 3

1.2 Motivação 5

1.3 Estrutura do texto 6

Capítulo 2 – Mercado Ibérico de Eletricidade **9**

2.1 Evolução do setor elétrico português 11

2.2 Evolução do setor elétrico espanhol 16

2.3 Funcionamento do MIBEL e contratação de energia 20

2.3.1 OMIE 20

2.3.1.1 Mercado diário 21

2.3.1.2 Mercado intradiário 23

2.3.1.3 Definição do preço em que a energia é negociada 24

2.3.1.4 Market splitting 26

2.3.2 OMIP 28

2.3.2.1 Produtos financeiros negociados no OMIP 29

2.3.2.1.1 Contratos de Futuros 29

2.3.2.1.2 Contratos Forward 30
2.3.2.1.3 Contratos de Swap 30
2.3.2.1.4 Contratos de Opções 30
2.4 Caracterização do MIBEL 31
2.4.1 Evolução dos preços de 2007 a 2014 31
2.4.2 Quantidade de energia transacionada por tecnologia 33
Capítulo 3 – Análise de dados circulares 43
3.1 Introdução 45
3.2 Métodos de estatística circular 46
3.2.1 Vetor resultante 49
3.2.2 Média circular 50
3.2.3 Mediana circular 51
3.2.4 Quartis 51
3.2.5 Variância circular 51
3.2.6 Intervalo de variação circular - range 52
3.2.7 Desvio padrão circular 52
3.3 Distribuições - uniforme e de Von Mises 53
3.3.1 Teste de uniformidade e Von Mises – teste de Watson 54
3.3.1.1 Teste de Watson – uniformidade 55
3.3.1.2 Teste de Watson – Von Mises 55
Capítulo 4 – Aplicação ao MIBEL 59
4.1 Introdução 61
4.2 Estudo dos preços máximos diários no MIBEL 62
4.2.1 Origem dos dados - preços máximos diários 62
4.2.2 Metodologia 63
4.2.3 Número de observações (n) 65
4.2.4 Representação gráfica 67

4.3 Análise de resultados – estudo dos preços máximos 70

4.3.1 Análise de gráficos circulares – preços máximos 70

4.3.1.1 Comparação entre Portugal e Espanha 70

4.3.1.2 Comparação de preços máximos entre o 1º e 3º trimestre 73

4.3.1.3 Análise da evolução dos preços máximos diários 78

4.3.2 Análise descritiva - métodos de estatística circular 83

4.3.2.1 Média circular 84

4.3.2.2 Mediana circular 85

4.3.2.3 Quartis 85

4.3.2.4 Intervalo de variação circular - *range* 87

4.3.2.5 Variância Circular 88

4.3.2.6 Desvio padrão circular 89

4.3.3 Testes de uniformidade e Von Mises 89

4.3.3.1 Teste de Watson – verificação se distribuição é uniforme 89

4.3.3.2 Teste de Watson – verificação se distribuição é Von Mises 90

4.4 Estudo de dados de procura e produção de energia elétrica 90

4.4.1 Origem dos dados – procura e produção de energia elétrica 91

4.4.2 Análise de gráficos circulares – procura e produção 92

4.4.3 Análise de concordância 99

Capítulo 5 – Conclusões e trabalho futuro 107

Referências Bibliográficas 113

Anexos 119

Anexo 1 - Resumo gráficos circulares 1ºs trimestres entre 2010 e 2014 em Portugal
Anexo 2 - Resumo gráficos circulares 1ºs trimestres entre 2008 e 2009 em Portugal
Anexo 3 - Resumo gráficos circulares 3ºs trimestres entre 2010 e 2014 em Portugal
Anexo 4 - Resumo gráficos circulares 3ºs trimestres entre 2007 e 2009 em Portugal
Anexo 5 - Resumo gráficos circulares 1ºs trimestres entre 2010 e 2014 em Espanha
Anexo 6 - Resumo gráficos circulares 1ºs trimestres entre 2008 e 2009 em Espanha
Anexo 7 - Resumo gráficos circulares 3ºs trimestres entre 2010 e 2014 em Espanha
Anexo 8 - Resumo gráficos circulares 3ºs trimestres entre 2007 e 2009 em Espanha
Anexo 9 - Modeling of cyclic events in electricity markets using circular statistical methods

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Energia anual transacionada por tecnologia no mercado diário 36
Tabela 4.1 Preços da energia no mercado diário 65
Tabela 4.2 Número de preços máximos diários no 1º trimestre entre 2008 e 2014 66
Tabela 4.3 Número de preços máximos diários no 3º trimestre entre 2007 e 2014 66
Tabela 4.4 Média circular (horas) – hora média do preço máximo diário no 1º trimestre e 3º trimestre 84
Tabela 4.5 Quartis da hora em que se atingem os preços máximos no mercado diário, no 1º trimestre 86
Tabela 4.6 Quartis da hora em que se atingem os preços máximos no mercado diário, no 3º trimestre 87
Tabela 4.7 Intervalo de variação circular (horas) - preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre 88
Tabela 4.8 Variância Circular (rad) - hora do preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre 88
Tabela 4.9 Desvio padrão circular (rad) - preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre 89
Tabela 4.10 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Portugal e em Espanha no mercado diário 101
Tabela 4.11 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Portugal no mercado diário e hora de máxima produção em cada tecnologia 102
Tabela 4.12 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Portugal no mercado diário e hora de máxima procura de energia elétrica..... 102
Tabela 4.13 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Espanha no mercado diário e hora de máxima produção em cada tecnologia 103
Tabela 4.14 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Espanha no mercado diário e hora de máxima procura de energia elétrica..... 104

Índice de Figuras

Figura 1.1 Transição para o regime liberalizado 5
Figura 2.1 Evolução do sistema elétrico português entre 1976 e 1996 11
Figura 2.2 Evolução do sistema elétrico português entre 1997 e 2007 14
Figura 2.3 Organização do setor elétrico português 15
Figura 2.4 Preço horário da energia no mercado diário, dia 28/08/2015 21
Figura 2.5 Representação de sessões do mercado intradiário 23
Figura 2.6 Curva de procura – mercado diário, hora 1 dia 28/08/2015 24
Figura 2.7 Curva de oferta – mercado diário, hora 1 dia 28/08/2015 25
Figura 2.8 Curvas de oferta e procura – mercado diário, hora 1 dia 28/08/2015 25
Figura 2.9 Preço horário – mercado diário, dia 01/02/2008 26
Figura 2.10 Capacidade e ocupação – interligação Espanha/Portugal, dia 01/02/2008 27
Figura 2.11 Valor do preço mínimo, médio e máximo casado – mercado diário 31
Figura 2.12 Evolução da capacidade comercial de exportação e importação 32
Figura 2.13 Evolução da separação dos mercados e da capacidade de interligação 33
Figura 2.14 Energia anual transacionada por tecnologia no mercado diário 34
Figura 2.15 Energia transacionada no mercado diário, por tecnologia 35
Figura 2.16 Energia transacionada no mercado diário, por tecnologia em 2015 37
Figura 2.17 Evolução da potência instalada de energia renovável em Portugal 38
Figura 2.18 Evolução da potência instalada das fontes de produção em Portugal 39
Figura 2.19 Evolução da potência instalada de energia eólica em Portugal 40
Figura 2.20 Evolução da potência instalada de energia eólica em Espanha 40
Figura 3.1 Circunferência de raio unitário e medição de ângulo 46
Figura 3.2 Definição do sentido de rotação 47
Figura 3.3 Média aritmética 48
Figura 3.4 Vetor resultante 49
Figura 4.1 Representação horária 64
Figura 4.2 Histograma linear das horas dos preços máximo diários – 3º trimestre de 2014, em Portugal 67
Figura 4.3 Gráfico circular das horas dos preços máximo diários – 3º trimestre de 2014, em Portugal 68

Figura 4.4 Frequência das horas dos preços máximo diários – 3º trimestre de 2014, em Portugal 69
Figura 4.5 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre de 2014, em Portugal e Espanha 71
Figura 4.6 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 3º trimestre de 2013, em Portugal e Espanha 72
Figura 4.7 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre do ano de 2014, em Portugal 75
Figura 4.8 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre, entre 2013 e 2011, em Portugal 76
Figura 4.9 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre, entre 2008 e 2010, em Portugal 77
Figura 4.10 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre entre 2009 e 2014, em Espanha 79
Figura 4.11 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre de 2008, em Espanha 80
Figura 4.12 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 3º trimestre de 2007 e 2008, em Espanha 81
Figura 4.13 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 3º trimestre entre 2009 e 2014, em Espanha 82
Figura 4.14 Definição de origem e sentido de rotação 83
Figura 4.15 Energia transacionada no MIBEL por tecnologia 93
Figura 4.16 Gráfico circular da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário e gráfico circular da frequência da hora em que é atingida a produção máxima hídrica diária, no 1º trimestre de 2008, em Espanha 94
Figura 4.17 Gráfico circular da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário e gráfico circular da frequência da hora em que é atingida a produção máxima hídrica diária, no 1º trimestre de 2014, em Espanha 95
Figura 4.18 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingida a procura e produção máxima nas tecnologias Carvão, Gás, PRE, no 1º trimestre de 2014, em Espanha 97
Figura 4.19 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingida a produção máxima nas centrais a carvão, no 3º trimestre de 2014 em Portugal e em Espanha 98

Figura 4.20 Hora em que o preço máximo diário foi atingido 100
Figura 4.21 Hora em que foi atingida a quantidade máxima diária de produção de determinada tecnologia 100
Figura 4.22 Concordância entre hora em que o preço máximo diário foi atingido e hora em que foi atingida a quantidade máxima diária de produção de determinada tecnologia 100

Lista de Acrónimos

CAE - Contratos de Aquisição de Energia

CESUR - *Contratos de Energía para el Suministro de Último Recurso*

CNE - *Comisión Nacional de Energía*

CNSE - *Comisión Nacional del Sistema Eléctrico*

EEX - *European Energy Exchange*

EDP - Energias de Portugal

ERSE - Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

LOSEN - *Ley Orgánica del Sector Eléctrico Nacional*

MIBEL - Mercado Ibérico da Eletricidade

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

OMI - Operador de Mercado Ibérico

OMIE - *Operador del Mercado Ibérico Español*

OMIP - Operador do Mercado Ibérico Português

OTC - *Over-the-Counter*

MLE - *Marco Legal Estable*

PRE - Produção em Regime Especial

RNT - Rede Nacional de Transporte

SEI - Sistema Elétrico Independente

SEN - Sistema Elétrico Nacional

SENV - Sistema Elétrico Não Vinculado

SEP - Sistema Elétrico Público

SEV - Sistema Elétrico Vinculado

TGCC - Turbinas a Gás com Ciclo Combinado

USA - *United States of America*

UK - *United Kingdom*

Lista de Símbolos

$\vec{R}$ – vetor resultante

C – coordenadas x

S – coordenadas y

$\bar{C}$ – média das coordenadas x

$\bar{S}$– média das coordenadas y

$\bar{\theta}$ – média circular

$\bar{R}$ – comprimento da média resultante

V – variância circular

ϑ – desvio padrão

Q_p – quartil p

R – comprimento do vetor resultante

$H_{max.rad}$ – hora em que o preço máximo é atingido em radianos

H – hora em que o preço máximo é atingido em horas

Capítulo 1 Introdução

Este capítulo contém uma introdução da dissertação. Apresenta-se o enquadramento do setor da energia elétrica, identificam-se as ideias fundamentais que motivaram a escolha do tema e descreve-se a forma como o texto está organizado.

1 - Introdução

1.1 Enquadramento

A energia elétrica apresenta propriedades que a tornam um bem de consumo com características muito específicas. Apesar de ao longo das últimas décadas terem sido feitos grandes esforços e fortes investimentos no desenvolvimento tecnológico e industrial com o objetivo de encontrar novas soluções, ainda não é possível efetuar o armazenamento de energia elétrica, em quantidades significativas e de forma economicamente viável, por forma a possibilitar a desassociação temporal total, entre a produção e o consumo (Sá, 2003).

Outra característica relevante desta forma de energia, resulta do facto de que ao contrário de outros bens, que se transportam por estradas ou condutas, no transporte de energia elétrica, existe dificuldade em dirigi-la por caminhos específicos em redes emalhadas, visto que flui nas linhas e em outros elementos, de acordo com as leis de Kirchhoff (Sá, 2003).

Assim, desde a sua origem o setor da energia elétrica foi classificado como sendo um monopólio natural. Na sua origem o setor elétrico estava organizado em torno de um conjunto de empresas verticalmente integradas. Na Europa estas empresas eram maioritariamente de propriedade estatal, e nos Estados Unidos da América, privadas com regulação.

Estas empresas eram responsáveis pela produção, transporte e distribuição aos consumidores das respetivas áreas de influência, de acordo com tarifas fixadas, em muitos casos, por intervenção direta dos governos.

O modelo de integração vertical permitiu aos poderes públicos implementar políticas de natureza estratégica e social, como a uniformidade tarifária, a eletrificação rural e o aproveitamento de recursos endógenos, promovendo o desenvolvimento de centrais produtoras, redes de transporte e distribuição de grande envergadura, sob o argumento da necessidade da existência de economia de escala (Gomes, 2005).

A década de 90 do século XX, trouxe profundas transformações no setor da energia elétrica. Motivações políticas e económicas alteraram o paradigma que existia anteriormente, provocando alterações no setor a nível mundial.

Para esta mudança contribuíram diversos acontecimentos históricos, nomeadamente: a queda do muro de Berlim, e consequente desmoronamento do bloco soviético; desenvolvimento do mercado interno europeu (Diretiva 96/92/CE); os programas de privatização, que se generalizaram em países como Reino Unido, Chile e Argentina; e em Portugal, a alteração da Constituição, com a retirada da irreversibilidade das nacionalizações e da reforma agrária (Sousa, 2005).

Por outro lado, a implementação de novos modelos económicos, e o desenvolvimento social nos diversos continentes, forçaram alterações no setor. Os modelos anteriores, que se baseavam em empresas monopolistas, sendo elas privadas ou públicas, promoviam muitas vezes sobreinvestimento em capacidade de produção, em detrimento dos interesses dos consumidores.

Com frequência, os resultados positivos das empresas, nomeadamente com a redução de custos de produção, não se refletiam no preço pago pelos consumidores pela energia. As mais-valias geradas eram canalizadas para investimentos no setor elétrico, nem sempre indispensáveis.

Outro aspeto importante que motivou estas mutações, foi a diferença de preços considerável que se verificava entre regiões, ou estados em países federais, tais como os EUA, onde era comum estados limítrofe terem preços de energia díspares.

Para além destas razões, o desenvolvimento de tecnologias, como por exemplo o aperfeiçoamento das tecnologias de produção de energia com recurso a Centrais de Turbinas a Gás com Ciclo Combinado (TGCC), aliada à expansão da oferta de gás natural, melhoraram significativamente a eficiência ao nível da produção, levando à extinção das condições de monopólio natural, permitindo a liberalização do mercado.

As reformas no setor elétrico, que se verificaram em grande parte dos países da OCDE, conforme esquematizado na Figura 1.1, consistiu na transição de um sistema que integrava verticalmente as áreas da produção, transporte, distribuição e comercialização de energia elétrica, parcial ou totalmente detido por capitais públicos, para um sistema que separa as áreas potencialmente competitivas da produção e comercialização, das áreas

não competitivas do transporte e distribuição, sendo estas últimas objeto de regulação económica.

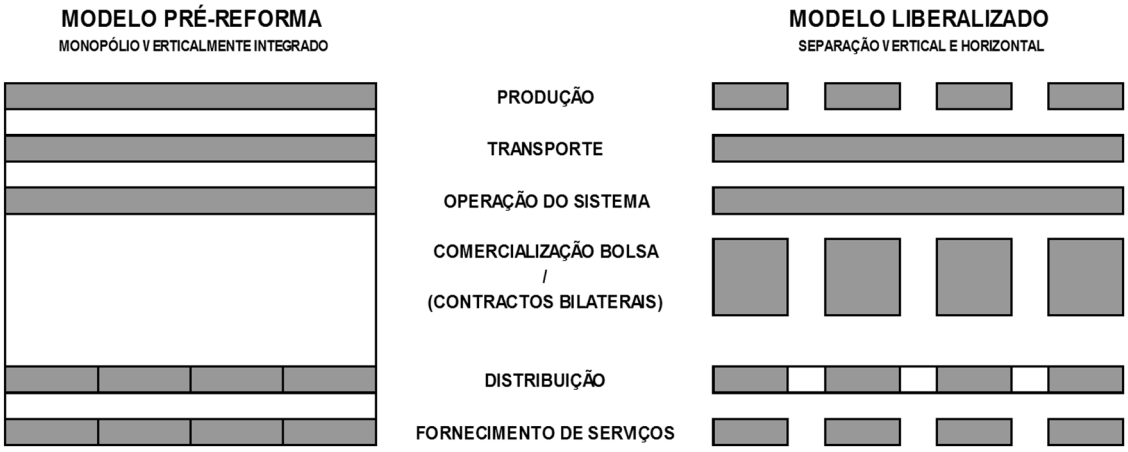


Figura 1.1 Transição para o regime liberalizado
(Sousa, 2005)

As profundas transformações no setor da energia elétrica, impostas pelas reformas introduzidas pelos diversos estados possibilitaram a criação de mercados de energia elétrica, na europa, nomeadamente *Nordpool* (Países Nórdicos), a EEX (Alemanha), a UK *Power Exchange* (Reino Unido) e a *Powernext* em França, com o objetivo final da criação de um mercado único europeu.

1.2 Motivação

Tendo como objetivo final, a criação de um mercado interno de eletricidade europeu, foram constituídos mercados regionais no espaço da União Europeia. Neste contexto surge a integração dos mercados de eletricidade da Península Ibérica, denominado mercado ibério de eletricidade, MIBEL.

O MIBEL constitui-se a nível europeu como um mercado regional de energia elétrica, tendo na sua génese o propósito da integração e cooperação dos setores elétricos de Portugal e Espanha, por forma a uniformizar as condições técnicas e económicas dos dois países.

No funcionamento dos mercados de energia elétrica, ocorrem situações atípicas relevantes que se repetem ao longo de ciclos temporais, nomeadamente situações em que os preços de energia ou de outras matérias-primas atingem valores extremos - máximos ou mínimos.

Nesta dissertação pretende-se descrever e modelar ocorrências, cuja natureza cíclica permite a utilização de métodos de estatística circular. A aplicação deste tipo de metodologia permite visualizar e comparar perfis alternativos a partir de conjuntos de observações diferentes.

Os métodos de estatística circular são utilizados para descrever acontecimentos aleatórios com natureza cíclica. Este tipo de métodos tem sido utilizado para estudar fenómenos muito diversos, nomeadamente: direção do vento, movimentos migratórios, comportamentos de espécies animais, entre outros. Neste trabalho, foi aplicado este tipo de metodologia em séries temporais de dados do MIBEL.

Aplicar este tipo de metodologia a séries de dados de mercados de energia elétrica, constitui uma abordagem inovadora, não tendo sido ainda explorada convenientemente, apesar destes, terem características propicias para a sua utilização.

Neste momento, com o MIBEL em atividade desde julho de 2007, é possível recolher um número significativo de dados e estudá-los com recurso a métodos de estatística circular, de modo a aprofundar o conhecimento acerca do seu comportamento.

1.3 Estrutura do texto

A dissertação está estruturada em cinco capítulos. No primeiro é feita a introdução do tema, através de um enquadramento do setor elétrico, e enunciam-se os motivos que levaram à criação de mercados energia elétrica. Seguidamente é apresentada a motivação, e são referenciados os objetivos a que o trabalho se propõe. Por fim é definida a estrutura do texto.

O segundo capítulo contém uma descrição dos acontecimentos mais relevantes até à entrada em funcionamento do Mercado Ibérico de Eletricidade. Identificam-se os principais agentes do mercado, e descrevem-se as principais regras de funcionamento do MIBEL.

No terceiro capítulo, é feita a introdução à análise de dados circulares. São referenciados outros trabalhos, onde se utilizam este tipo de metodologia. Por fim, apresentam-se métodos aplicados em estatística de dados circulares, incluindo testes de uniformidade.

O quarto capítulo contém uma apresentação do caso de estudo, em que são aplicados métodos de estatística circular a dados do MIBEL. É identificada a origem dos dados e descrita a metodologia desenvolvida. Por fim são apresentados os resultados.

Por último, no quinto capítulo apresentam-se conclusões e sugerem-se perspetivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Mercado Ibérico de Eletricidade

Este capítulo contém uma descrição dos acontecimentos mais relevantes até à entrada em funcionamento do Mercado Ibérico de Eletricidade. Identificam-se os principais agentes do mercado, e descrevem-se as principais regras de funcionamento do MIBEL.

2 - Mercado Ibérico de Eletricidade

O Mercado Ibérico de Eletricidade – MIBEL, resulta de um processo de cooperação desenvolvido pelos Governos de Portugal e Espanha, com o objetivo de promoverem a integração dos sistemas elétricos dos dois países, contribuindo para a concretização do mercado de energia elétrica a nível ibérico, constituindo-se como um passo significativo para a construção do mercado interno de energia europeu (MIBEL, 2016).

2.1 Evolução do setor elétrico português

Nos últimos quarenta anos, o setor elétrico sofreu profundas transformações, conforme representado na Figuras 2.1 e na Figuras 2.2.

No ano de 1976, a partir da fusão de treze empresas nacionalizadas no ano anterior, deu-se a constituição de uma única empresa nacional verticalmente integrada (EDP – Eletricidade de Portugal, empresa que deu origem à atual EDP- Energias de Portugal). Esta empresa concentrava a produção, transporte, operação do sistema, distribuição e fornecimento dos serviços de energia elétrica.

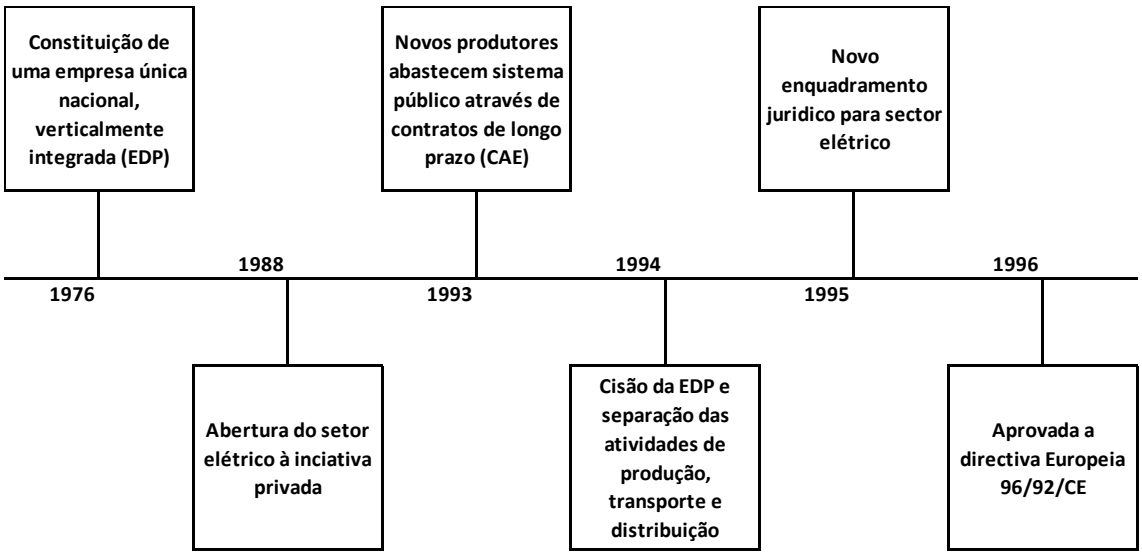


Figura 2.1 Evolução do sistema elétrico português entre 1976 e 1996
Adaptado de (ERSE, 2016)

Doze anos mais tarde surge a abertura do setor elétrico à iniciativa privada, dando inicio à liberalização do setor elétrico.

Em 1993, novos produtores começaram a abastecer o sistema público através de contratos de aquisição de energia a longo prazo CAE (contratos de aquisição de energia). Este tipo de contratos estabelecia quantidades e preços garantidos.

No ano seguinte dá-se a cisão da EDP, e a correspondente separação jurídica das atividades de produção, transporte e distribuição, permitindo a separação vertical e horizontal da empresa.

Em 1995, foi dado um passo decisivo no sistema elétrico português, com a introdução de legislação, com a publicação dos Decretos de Lei 182 a 188 de 27 de julho (República D. d., 1995), passou a haver uma separação entre o sistema liberalizado, sistema elétrico não vinculado, SENV, e sistema regulado, sistema elétrico público, SEP. Nesta altura também foi criada a autonomização da rede nacional de transporte, RNT.

Em 1996, foi aprovada a Diretiva Europeia 96/92/CE (Europeia, 1996), com vista à criação do mercado interno europeu.

Esta diretiva baseou-se em três princípios fundamentais:

- Princípio da subsidiariedade, segundo o qual cabia aos estados membros, com base na sua organização institucional, garantir a exploração das empresas que operam no setor do mercado elétrico de acordo com os princípios europeus consagrados na Diretiva, nomeadamente a não discriminação no que respeita a direitos e obrigações, com vista ao desenvolvimento de um mercado de eletricidade em ambiente de plena concorrência;

- Cada estado membro, devia impor obrigações de serviço público, relativas à segurança do abastecimento, ao preço e sua regularidade e qualidade. Essas obrigações deviam ser claramente definidas, transparentes, não discriminatórias, controladas e controláveis;

- Foi no entanto mantida a possibilidade de abolição parcial do regime adotado em nome do interesse económico geral. As instâncias europeias foram sensíveis à

existência de dificuldades específicas de adaptação dos sistemas vigentes nalguns países, que dificultavam o cumprimento das obrigações de serviço público impostas.

A uniformização de regras quanto ao acesso à atividade de produção passou a ser estabelecida através de um mecanismo jurídico à escala europeia. Os sistemas de autorização e de adjudicação por concurso passaram a fazer-se uniformemente em todos os estados membros, com base na transparência, na prossecução do interesse económico geral e na livre concorrência.

A exploração da rede de transporte passou a estar a cargo de um operador, também responsável pela sua manutenção e desenvolvimento, de acordo com critérios fixados por cada governo. Tendo a seu cargo a gestão dos fluxos de energia na rede, o operador ficou responsável por garantir a sua segurança, fiabilidade e eficácia, não tomando medidas discriminatórias entre os respetivos utilizadores.

Tal como aconteceu com a rede de transporte, também a exploração da rede de distribuição foi entregue a um operador responsável pela sua segurança, fiabilidade e eficácia, podendo ser obrigado ao fornecimento de clientes localizados em determinadas áreas, economicamente desinteressantes, com preços de fornecimento regulamentados.

O operador da rede de distribuição, assumiu a respetiva manutenção e desenvolvimento. O combate à discriminação no acesso à rede continuou a ser uma prioridade, pelo que se esperava do operador da rede de distribuição uma atitude de não discriminação face a terceiros (Guedes, 2012).

Com a separação dos dois sistemas, Sistema Elétrico Público, SEP e Sistema Elétrico não Vinculado, SENV, surgiu a necessidade de criar uma entidade reguladora independente.

Em 1997, através do Decreto-Lei nº 44/97, (República, 1997) é criada a ERSE (Entidade Reguladora do Setor Elétrico, que deu origem a atual Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos), com o objetivo de regular o Sistema Elétrico Nacional.

Foi constituída com a natureza de pessoa coletiva de direito público, dotada de autonomia administrativa e financeira e de património próprio e com características de independência.

Na Figura 2.2, apresentam-se os acontecimentos mais relevantes desde o ano de 1997, que precederam a entrada em funcionamento do MIBEL em 2007.

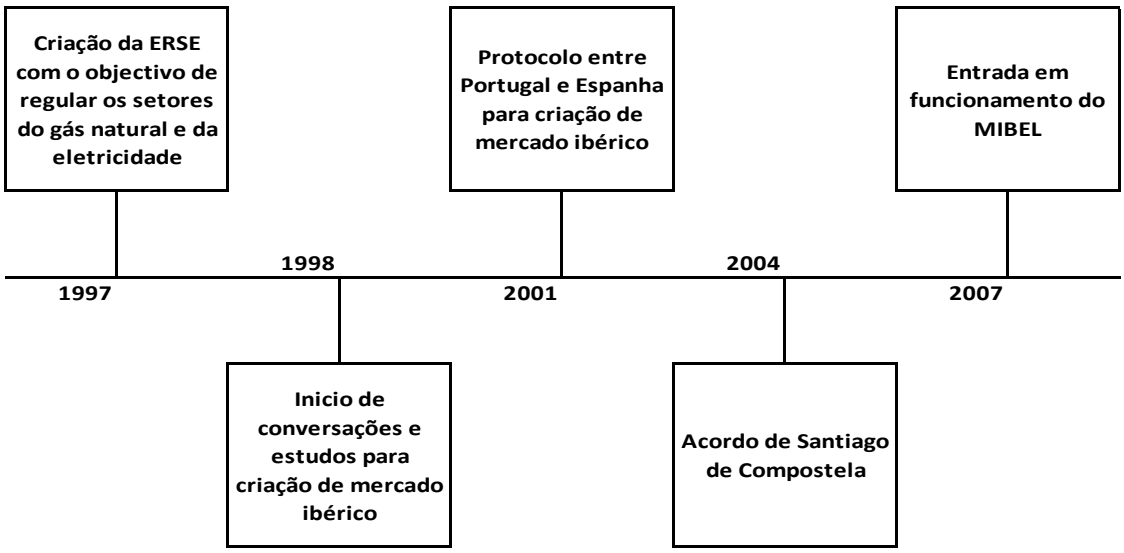


Figura 2.2 Evolução do sistema elétrico português entre 1997 e 2007
Adaptado de (ERSE, 2016)

No ano de 1998 a administração portuguesa e a administração espanhola, iniciaram conversações e estudos, para progressivamente, eliminarem obstáculos, com o objetivo de desenvolverem condições para a criação de um mercado de energia elétrica ibérico. Em Novembro de 2001, foi assinado o protocolo de colaboração entre as duas administrações com vista à criação do MIBEL.

Em Outubro de 2004 foi assinado em Santiago de Compostela um acordo entre a República Portuguesa e o Reino da Espanha relativo à constituição de um mercado ibérico de eletricidade, que criou um quadro estável, permitindo aos operadores dos sistemas elétricos dos países signatários desenvolverem a sua atividade em toda a Península Ibérica.

Na Figura 2.3, apresenta-se um esquema da estrutura anterior ao DL29/2006, do sistema elétrico português.

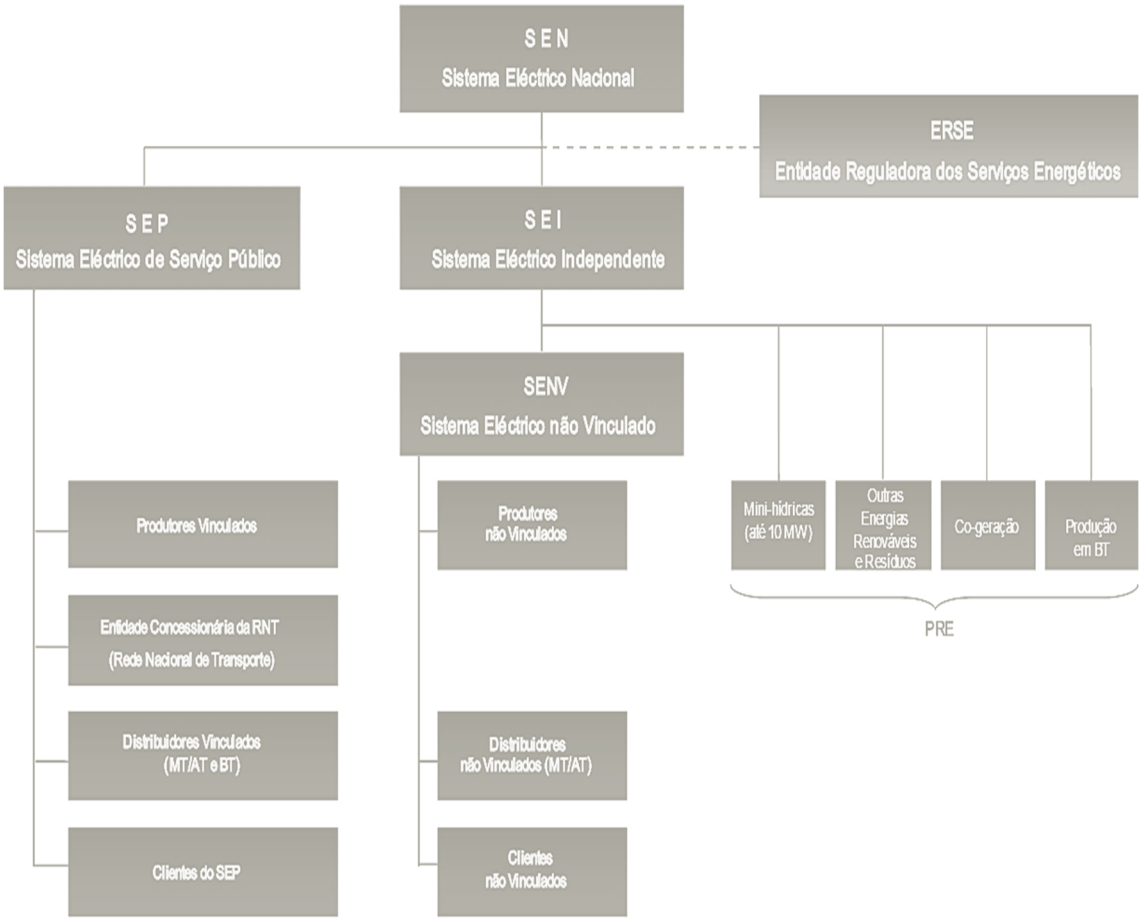


Figura 2.3 Organização do setor elétrico português (Sousa, 2005)

Como objeto do acordo figurava a criação e o desenvolvimento de um mercado de eletricidade comum a ambos os países designado por "Mercado Ibérico de Energia Elétrica" – MIBEL, que constituiu um marco significativo de um processo de integração dos sistemas elétricos de Portugal e de Espanha, assim como um passo para a construção do mercado interno de energia elétrica na União Europeia (ERSE, 2016).

Em 1 de julho de 2007, o MIBEL arrancou em toda a sua dimensão, coroando o trabalho de harmonização de condições entre os dois sistemas elétricos ibéricos, na perspetiva de que do seu funcionamento adviriam benefícios para os consumidores de ambos os países.

2.2 Evolução do setor elétrico espanhol

No final da década de 70 do século XX, verificaram-se graves problemas estruturais e financeiros na indústria elétrica espanhola.

O agravamento da situação financeira teve por base um conjunto de ocorrências, nomeadamente: a crise petrolífera (1973 a 1979); um sobreinvestimento fruto de um inadequado dimensionamento de infraestruturas de produção, transporte e distribuição, realizados tendo por base estimativas de crescimento de procura demasiado otimistas; atraso na construção e consequente colocação em serviço de centrais nucleares; endividamento devido a flutuação cambial (variação da valorização da moeda nacional espanhola face ao dólar); custos financeiros elevados originados pelos pontos anteriores (España, 2008). A consequência destes desequilíbrios foi o crescimento de elevadas dívidas ao exterior.

Para impedir a insolvência das empresas do setor, o estado interveio, decidindo concentrar as atividades do setor e consolidar as empresas municipais em dez empresas regionais verticalmente integradas, e tornar a Endesa uma empresa de produção pura.

O conjunto de medidas adotadas para introduzir a reestruturação do setor, foram consolidadas com o MLE, *Marco Legal Estable*, de acordo com o *Real Decreto* 1538/1987 de 11 de Dezembro de 1987, definindo-se uma tarifa elétrica nacional uniforme, diferenciada por volume e tipo de utilização (Silva, 2007).

Este acordo teve como objetivo: proporcionar um compromisso de referência estável ao sistema das empresas fornecedoras de energia elétrica e a determinação de tarifas com custos controlados, possibilitando a prestação de um serviço de fornecimento de eletricidade em condições económicas adequadas aos clientes finais; fomentar a eficiência do setor através do estabelecimento de um sistema de incentivos na gestão das empresas; reduzir dúvidas nas decisões de gestão das atividades de fornecimento de energia, e dos investimentos; garantir a recuperação dos investimentos em ativos produtivos ao longo da sua vida útil; permitir a planificação correta das atividades de fornecimento de energia; fomentar o aumento da estabilidade da tarifa (España, 2008)

O setor elétrico espanhol até ao início da década de 90, era formado por um conjunto de empresas verticalmente integradas, que operavam em áreas geográficas específicas. Estas empresas estavam distribuídas pelas diversas regiões do território e não

competiam entre si, uma vez que os clientes estavam ligados fisicamente e comercialmente à empresa concessionária da sua região (Pereira, 2010).

As atividades de transporte e de despacho, estavam integrados na mesma entidade e a regulação tarifária era realizada através do Estado, fixando uma tarifa única para todo o país, tendo em conta aspetos sociais e políticos (Mourão, 2013)

O início da transição para um regime liberalizado, ficou marcado pela reforma legislativa de dezembro de 1994, com a *Ley Orgánica del Sector Eléctrico Nacional*, LOSEN. No entanto, esta nova lei era ambígua, porque apontava para a introdução faseada de reformas, com a coexistência de um mercado regulado, a operar segundo as regras do MLE, contemplando também um segmento competitivo apoiado num mercado *spot*.

A legislação publicada em 1995 teve como finalidade reestruturar o setor, introduzindo uma nova organização definindo dois sistemas diferentes: o sistema integrado e o sistema independente. O sistema integrado era caraterizado pela obrigatoriedade de serviço público, enquanto que o sistema independente tinha como principal objetivo, permitir a existência de contratos bilaterais. As alterações introduzidas permitiram a separação da produção de energia elétrica da sua distribuição (Tomé, 2009).

Apesar de esta disposição nunca ter sido implementada, o espírito de uma reestruturação gradual nela implícita permaneceu na lei atualmente em vigor. Da LOSEN resultou a criação de uma instituição reguladora independente, a *Comisión Nacional del Sistema Eléctrico*, CNSE, atualmente *Comisión Nacional de Energia*, CNE, que tinha como principal função garantir a transparência do processo regulatório e a proteção dos interesses dos consumidores. As características principais da reestruturação centravam-se em três vertentes:

- Completa liberalização da entrada na produção;
- Introdução de um mercado *spot* concorrencial para o comércio grossista;
- Progressiva liberalização da comercialização; (Silva, 2007)

Verificando-se uma grande contestação, em novembro de 1997, foi aprovada uma nova lei, a *Ley 54/1997 del Sector Eléctrico* (Estado, "Ley 54/1997", 1997). Com as alterações introduzidas, e a promoção da separação vertical, deu-se o início à liberalização do setor com a criação do mercado de eletricidade espanhol.

O modelo do setor elétrico espanhol passou assim a compreender a existência de dois sistemas: o sistema regulado e o sistema liberalizado. No sistema regulado, os consumidores adquiriam eletricidade dos diferentes distribuidores, estando o seu preço sob o regime de tarifas reguladas.

Já no caso do sistema liberalizado, a eletricidade era adquirida recorrendo a transações em bolsa ou através de contratos bilaterais.

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

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

A atuação dos produtores no setor elétrico espanhol passou a ser efetuado de duas formas, regime ordinário e regime especial.

a) Através do regime ordinário, passou a haver quatro formas de contratar a venda de energia elétrica e de determinar o seu preço:

    - Mercado de eletricidade grossista ou *pool*. Foi criado em 1 de janeiro de 1998 e incluía uma variedade de transações resultantes da participação dos agentes de mercado (entidades produtoras, consumidores elegíveis, distribuidores, comercializadores e agentes externos) nas sessões de mercado diário e intradiário;

- Contratos Bilaterais. Os contratos bilaterais relativos a contratos privados entre agentes do mercado, cujos termos e condições eram livremente negociados e acordados.

- Leilões VPP. Os principais participantes no mercado, Endesa e Iberdrola, eram obrigados por lei a oferecer opções de compra para uma quantidade pré-estabelecida de energia. Alguns dos restantes participantes podiam comprar as opções durante um certo período de tempo.

- Leilões - *Contratos de Energía para el Suministro de Último Recurso*, CESUR. Os distribuidores de último recurso, podiam adquirir eletricidade no mercado à vista ou a prazo para satisfazer a procura (Gonçalves, 2012).

b) Através do regime especial, para produção de energia elétrica com recurso a tecnologias de fontes de energia renovável e cogeração, com uma potência instalada até 50 MW. Esta energia era vendida através de uma *pool* ou aplicação de tarifa de referência.

   De acordo com *Real Decreto* 661/2007 de 25 de Maio (Estado, "Real Decreto 661/2007", 2007), as centrais sob o regime especial espanhol passaram a puder escolher entre uma tarifa fixa ou participar no mercado diário.

   Se o produtor em regime especial decidia operar no mercado, recebia o preço de mercado e um prémio, que variava consoante a tecnologia utilizada (Gonçalves, 2012).

Em 1 de julho de 2007 entrou em vigor o MIBEL, com funcionamento comum em Portugal e Espanha, substituindo o modo de funcionamento anterior.

2.3 Funcionamento do MIBEL e contratação de energia

No MIBEL a contratação da energia é feita de três formas:

- Mercado *spot* (mercado diário e mercado intradiário);
- Mercado a prazo;
- Mercado livre de contratação bilateral;

O Mercado Elétrico de Eletricidade, desenvolve-se em dois polos, o polo espanhol, OMIE - *Operador del Mercado Ibérico de Energia*, responsável pela negociação diária e intradiária; e o polo português OMIP - Operador de Mercado Ibérico de Energia, responsável pela negociação a prazo.

O MIBEL funciona como uma bolsa de energia elétrica, permitindo a compra e venda de eletricidade entre os agentes (produtores, consumidores e comercializadores).

2.3.1 OMIE

O OMIE, operador de mercado do polo espanhol, gere o mercado por grosso, pronto pagamento ou *spot*. Neste mercado, realizam-se as transações decorrentes da participação dos agentes nas sessões do mercado diário e do mercado intradiário que agregam, numa lógica de *market splitting*, as zonas espanhola e portuguesa do MIBEL.

A negociação no mercado diário efetua-se com base num leilão efetuado diariamente, com liquidação da energia em todas as horas do dia seguinte, formando-se um preço único para Espanha e para Portugal, para cada hora do dia.

Complementarmente, existem várias sessões do mercado intradiário, subsequentes ao leilão do mercado diário, em que é possível aos agentes, transacionar energia elétrica para as várias horas do dia. A negociação é feita em forma de leilão (OMIP, 2015).

2.3.1.1 Mercado diário

No mercado diário, os preços da eletricidade na Península Ibérica são estipulados diariamente às 12:00, para as 24 horas do dia seguinte, em cada dia, para cada um dos 365 ou 366 dias, de cada ano.

Na Figura 2.4 é possível verificar a variação dos preços nas diversas horas ao longo do dia, e a energia negociada no mercado diário ibérico, incluindo os contratos bilaterais. No dia 28 de agosto de 2015, verificou-se que o preço de mercado da energia, nos dois países foi coincidente ao longo de todo o dia. Em média a energia elétrica foi transacionada ao preço de 60,31€/MWh.

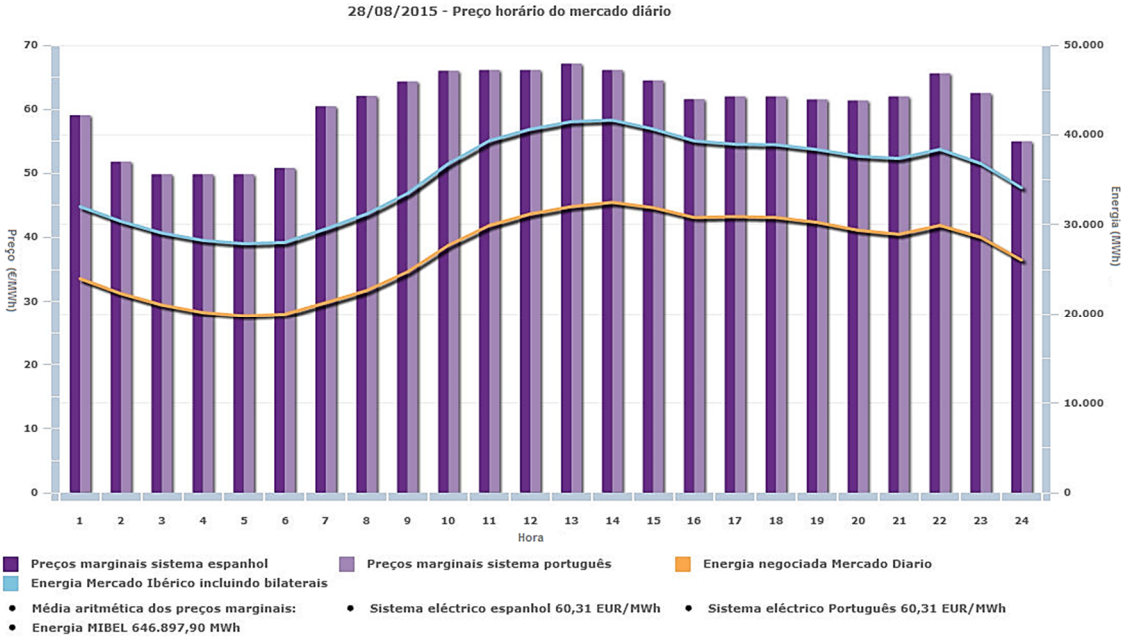


Figura 2.4 Preço horário da energia no mercado diário, dia 28/08/2015 (OMIE, 2016)

O preço e o volume de energia numa determinada hora são estabelecidos pelo cruzamento entre a oferta e a procura, conforme descrito na secção 2.3.1.3, seguindo o modelo marginalista adotado pela União Europeia, com base no algoritmo aprovado para todos os mercados europeus (EUPHEMIA).

Os agentes compradores e vendedores participam independentemente de estarem em Espanha ou em Portugal. As ofertas de compra e venda são aceites tendo em conta a sua ordem de mérito económico, até a interligação entre Espanha e Portugal ficar totalmente ocupada.

As ofertas económicas de venda de energia elétrica que os vendedores apresentam ao operador do mercado podem ser simples ou integrar condições complexas em função do seu conteúdo. As ofertas simples são ofertas económicas de venda de energia que os vendedores apresentam para cada período horário e unidade de produção da qual sejam titulares com expressão de um preço e de uma quantidade de energia.

As ofertas que integram condições complexas de venda são aquelas que, cumprindo com os requisitos exigidos para as ofertas simples, integram além disso, as seguintes condições técnicas ou económicas:

- Condição de indivisibilidade - permite fixar, no primeiro lanço de cada hora, um valor mínimo de funcionamento;

- Graduação de carga - permite estabelecer a diferença máxima entre a potência no início de hora e a potência no final de uma hora da unidade de produção, o que limita a energia máxima a alocar em função do despacho da hora anterior e da seguinte, para evitar mudanças bruscas nas unidades de produção que pode não ser possível seguir devido às caraterísticas técnicas dos grupos;

- Remuneração mínima - permite a realização de ofertas para todas as horas, embora tenha em conta que a unidade de produção não participa no resultado da negociação do dia, se não obtiver para o conjunto da sua produção no dia, uma remuneração superior a uma quantidade fixa, estabelecida em cêntimos de euros, mais uma remuneração variável estabelecida em cêntimos de euro por cada kWh alocado.

- Paragem programada - permite que caso a unidade de produção tenha sido retirada do despacho por não cumprir a condição solicitada de remuneração mínima, realize uma paragem programada num tempo máximo de três horas.

  Desta forma, evita-se a paragem desde o programa na última hora do dia anterior até à primeira hora do dia seguinte, mediante a aceitação do primeiro lanço para as três primeiras horas da sua oferta como ofertas simples, com a única condição de que a energia oferecida seja decrescente no primeiro lanço de cada hora (ERSE, 2016).

2.3.1.2 Mercado intradiário

O mercado intradiário do MIBEL é uma plataforma complementar ao mercado diário, no qual se transaciona energia elétrica para ajustar as quantidades transacionadas no mercado diário, compreendendo seis sessões diárias de negociação.

Na Figura 2.5 são representadas as 6 sessões do mercado intradiário.

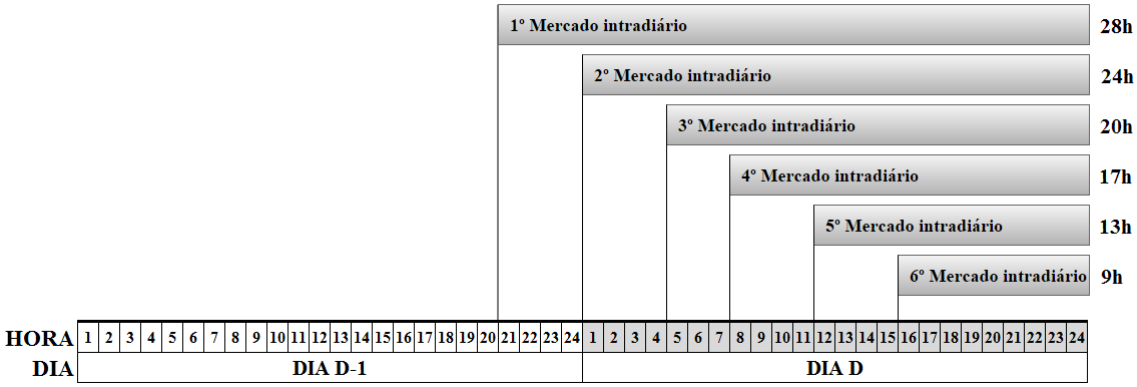


Figura 2.5 Representação de sessões do mercado intradiário (ERSE, 2016)

- Na primeira sessão do mercado intradiário, define-se o preço para as 4 últimas horas do dia D-1 e para as 24 horas do dia D;
- Na segunda sessão define-se o preço para as 24 horas do dia D;
- Na terceira sessão define-se o preço para as 20 horas compreendidas entre a hora 5 e a hora 24 do dia D;
- Na quarta sessão define-se o preço para as 17 horas compreendidas entre a hora 8 e a hora 24 do dia D;
- Na quinta sessão define-se o preço para as 13 horas compreendidas entre a hora 12 e a hora 24 do dia D;
- Na sexta sessão define-se o preço para as 9 horas compreendidas entre a hora 16 e a hora 24 do dia D.

Este mercado foi concebido para ajustar, de forma mais precisa e próxima do tempo real, a oferta e a procura resolvendo, deste modo, possíveis desajustes em sucessivas etapas da programação.

Neste mercado, e com o objetivo de retificar as suas posições anteriores, os agentes produtores também podem comprar energia e os agentes comercializadores também podem vender energia (ERSE, 2016)

Tal como sucede no mercado diário, o funcionamento do mercado intradiário está assente na sujeição de ofertas, de compra e de venda, por parte dos diversos agentes registados para atuar no mercado diário, indicando cada oferta por sessão o dia e a hora a que se reporta, o preço e a quantidade de energia correspondentes (ERSE, 2016).

2.3.1.3 Definição do preço em que a energia é negociada

Para a definição do preço a que a energia é transacionada, é traçada uma curva de oferta de compra, também conhecida por curva de procura, em que as várias ofertas de compra são ordenadas por mérito económico, ou seja, de forma decrescente de modo às ofertas de preço superior terem prioridade sobre as ofertas de preço inferior.

Na Figura 2.6, apresenta-se um exemplo de uma curva de procura, relativa ao dia 28 de agosto de 2015, que se verificou na hora 1 do mercado diário.

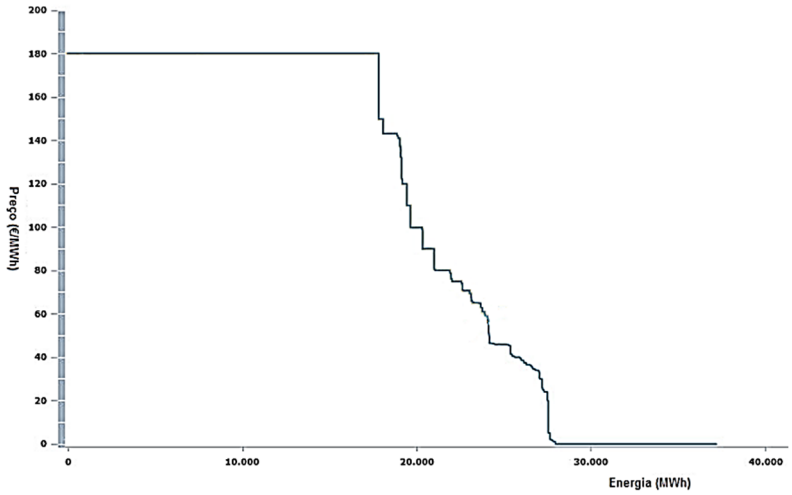


Figura 2.6 Curva de procura – mercado diário, hora 1 dia 28/08/2015 (OMIE, 2016)

Simultaneamente é traçada uma curva de ofertas de venda, também conhecida como curva de oferta, na Figura 2.7, em que as ofertas de venda são ordenadas de forma crescente, de modo a que as ofertas com preço inferior tenham prioridade sobre as ofertas de preço superior.

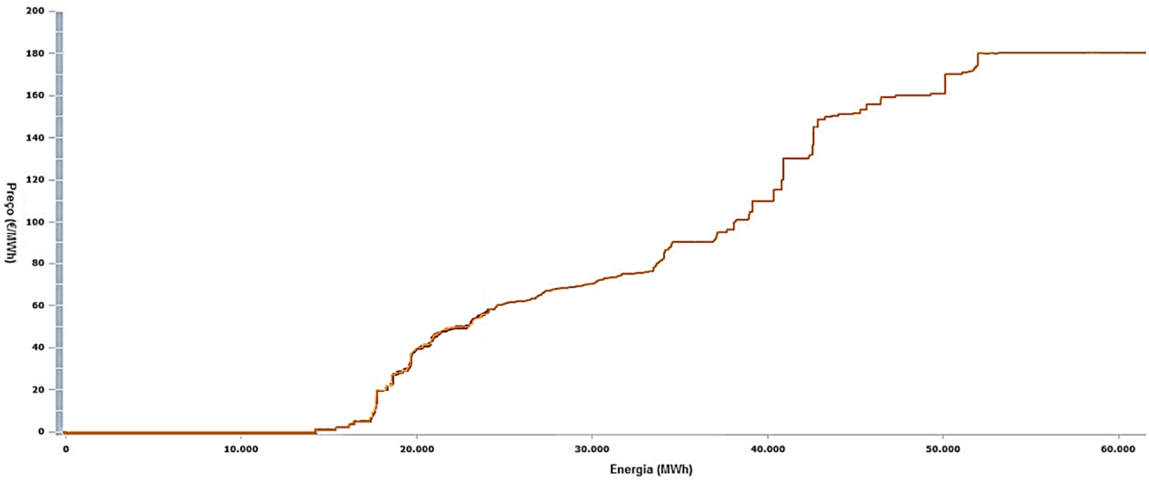


Figura 2.7 Curva de oferta – mercado diário, hora 1 dia 28/08/2015 (OMIE, 2016)

A energia das ofertas de compra e de venda casadas é transacionada, ao preço de fecho. Este preço é determinado pela intersecção das duas curvas, conforme se apresenta na Figura 2.8.

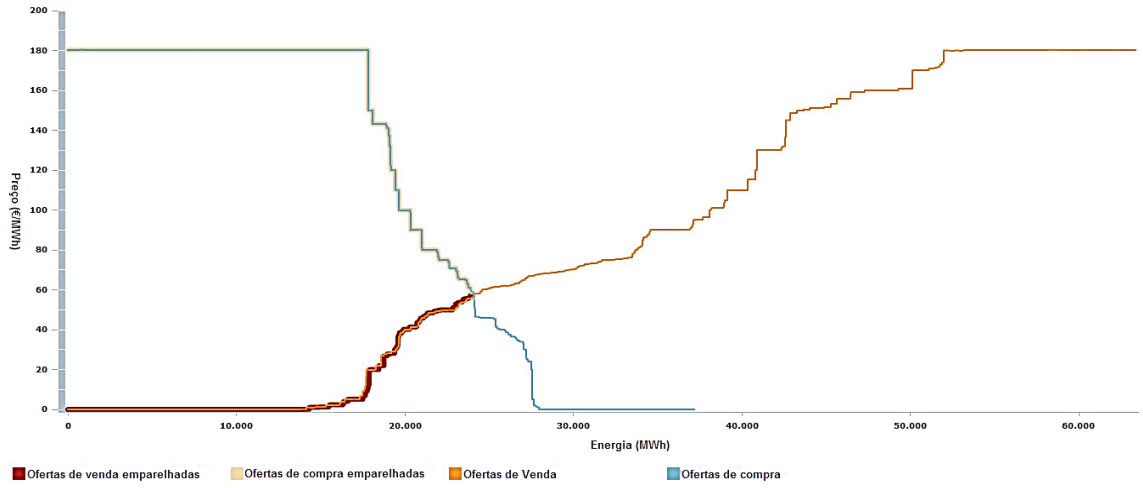


Figura 2.8 Curvas de oferta e procura – mercado diário, hora 1 dia 28/08/2015 (OMIE, 2016)

2.3.1.4 Market splitting

A capacidade disponível para o trânsito de energia entre os sistemas português e espanhol, nem sempre permite concretizar totalmente o encontro de ofertas agregadas de compra e de venda dos dois sistemas.

Se numa determinada hora do dia, a capacidade da interligação for suficiente para permitir o fluxo de energia elétrica negociado pelos agentes, o preço da eletricidade nessa hora será o mesmo em Espanha e em Portugal.

No entanto, se a capacidade de interligação for totalmente ocupada, nesse momento, o algoritmo para a fixação do preço (EUPHEMIA), é efetuado de forma separada. Deste modo verifica-se nestas horas uma diferença de preços entre os dois países. O mecanismo descrito para a formação do preço da eletricidade no mercado diário de Espanha e Portugal é conhecido como *market splitting*.

Na Figura 2.9 apresenta-se o preço horário ao longo do dia. Na maioria horas, de 1 de fevereiro de 2008, verifica-se a ocorrência de preços marginais diferentes em Portugal e Espanha, este fenómeno deve-se ao facto de existirem limitações na capacidade de interligação entre os dois países.

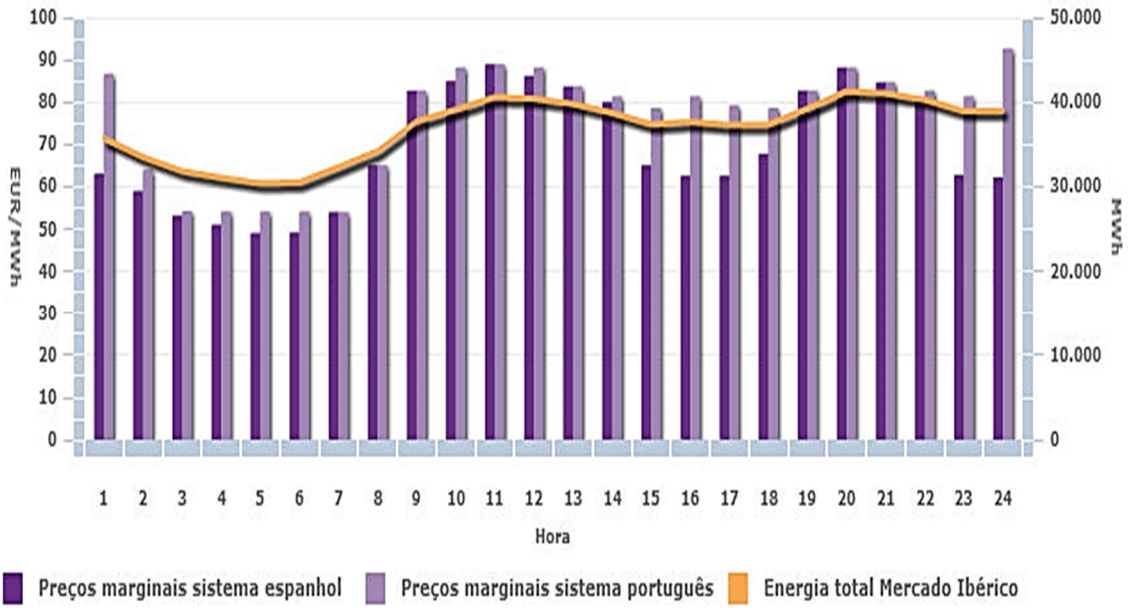


Figura 2.9 Preço horário – mercado diário, dia 01/02/2008 (OMIE, 2016)

Na Figura 2.10, pode visualizar-se a capacidade e a ocupação da interligação, ao longo do dia 1 de fevereiro de 2008.

Às 9:00, é possível constatar a ocupação da interligação para exportação de energia produzida em Espanha para satisfazer a procura em Portugal é 1047,9MWh. Uma vez que a ocupação da interligação, não chegou a atingir o limite da capacidade para exportação da energia de Espanha para Portugal, 1300,0MWh, a energia pôde ser exportada na totalidade, havendo por isso uma convergência de preços em Portugal e Espanha.

Já às 24:00, o limite de ocupação da interligação para foi atingido, ocorrendo *market splitting*, e a energia nesta hora foi transacionada a um preço diferente, em cada um dos países.

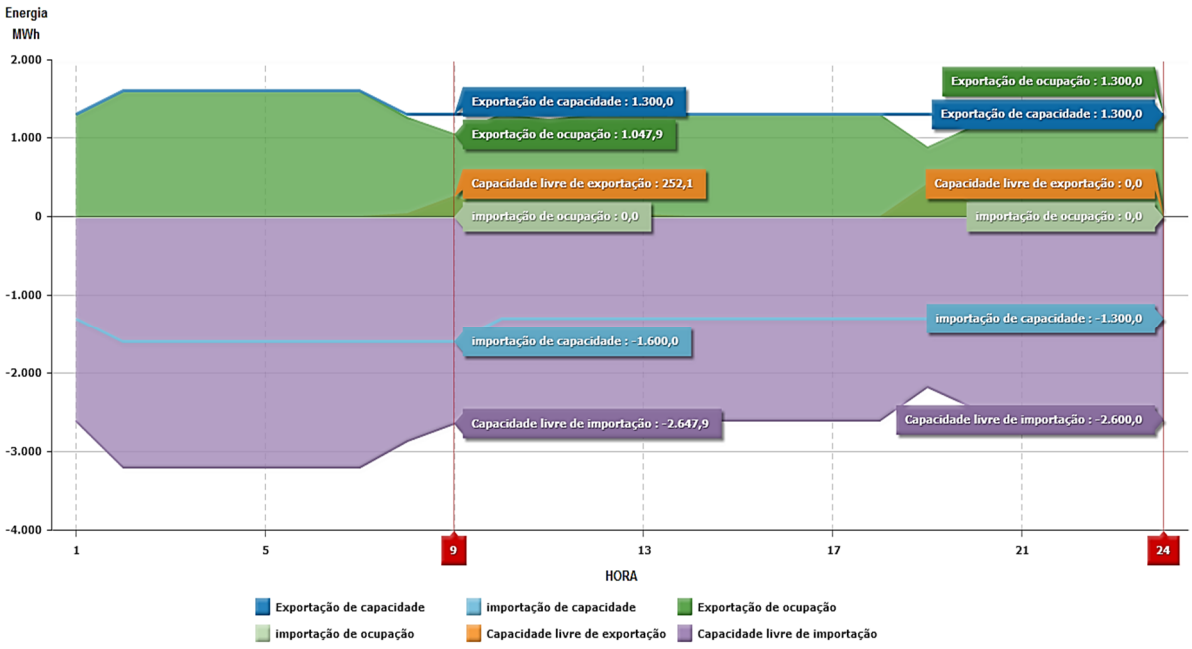


Figura 2.10 Capacidade e ocupação – interligação Espanha/Portugal, dia 01/02/2008 (OMIE, 2016)

2.3.2 OMIP

O OMIP, operador de mercado ibérico polo português, é a bolsa de derivados do MIBEL. Este assegura a gestão do mercado conjuntamente com a OMIClear, uma sociedade constituída e detida totalmente pelo OMIP que assume funções de câmara de compensação e contraparte central das operações realizadas no mercado (OMIP, 2015).

As transações executam-se do seguinte modo: uma vez registada uma operação, a OMIClear procede à gestão das posições daí resultantes, assumindo-se como compradora face ao vendedor e como vendedora face ao comprador (OMIP, 2015).

Este procedimento elimina parte dos riscos das operações, nomeadamente:

- Crédito – no caso de uma parte não honrar os seus compromissos contratuais relativamente à outra;

- Liquidação – assegurando centralmente os débitos e créditos em dinheiro, numa lógica multilateral;

- Operacional – atendendo aos procedimentos e mecanismos de controlo e supervisão do mercado;

- Sistémico – atendendo o facto de introduzir operações financeiras que reduzem o risco de liquidação, recorrendo a uma distribuição por múltiplos (OMIP, 2015).

A negociação no mercado a prazo pode processar-se a dois níveis distintos:

- Negociação em contínuo, dentro do horário de negociação definido no Regulamento de Negociação;

- Negociação em leilão, realizando-se atualmente sessões específicas de leilão nas quatro primeiras quartas-feiras de cada mês, existindo obrigações de compra para os comercializadores ibéricos de último recurso (ERSE, 2016);

2.3.2.1 Produtos financeiros negociados no OMIP

No OMIP são negociados contratos a prazo dos seguintes tipos: contratos de Futuros, contratos *Forward,* contratos de *Swap* e contratos de Opções.

Os contratos de Futuros e os contratos *Forward*, são contratos de diferenciais, em que o produtor e o adquirente fixam um valor para a venda de energia elétrica, num determinado período, e o seu preço a prazo (preço *strike*), com referência ao que esperam que venha a ser o valor de mercado (preço *spot*).

Já os contratos de *Swap* e contratos de Opções, são contratos por diferença, em que uma parte do risco é cedida por um sujeito a outro contra o pagamento de um prémio.

No OMIP existe a possibilidade de se efetuarem liquidações de operações em *over-the-counter*, OTC. Este tipo de contratos derivados são negociados diretamente pelas partes numa relação direta, permitindo às partes negociar especificidades, de acordo com as suas necessidades, sem recorrerem aos mercados (Rochete, 2015).

Seguidamente, faz-se uma descrição dos diversos tipos de produto negociados no OMIP.

2.3.2.1.1 Contratos de Futuros

Os contratos de Futuros, atualmente os mais transacionados no OMIP, são contratos padronizados de compra ou venda de energia, para um determinado horizonte temporal, em que o comprador se compromete a adquirir eletricidade no período de entrega e o vendedor se compromete a colocar essa mesma eletricidade, a um preço determinado no momento da transação.

Este contrato tem liquidações diárias entre o preço de transação e a cotação de mercado de cada dia. Os agentes compradores e vendedores não se relacionam diretamente entre si, cabendo à câmara de compensação, a responsabilidade de liquidar as margens diárias e o contrato na data ou período de entrega (ERSE, 2016).

2.3.2.1.2 Contratos *Forward*

Os contratos *Forward*, são contratos padronizados, semelhantes aos contratos de Futuros, no entanto, não tem liquidações diárias das margens durante o período de negociação, sendo a margem liquidada integralmente nos dias de entrega física ou financeira (ERSE, 2016).

2.3.2.1.3 Contratos de *Swap*

Os contratos de *Swap*, são contratos padronizados, em que se troca uma posição em preço variável por uma posição de preço fixo, ou vice-versa, dependendo do sentido da troca. Este tipo de contratos destina-se a gerir ou tomar risco financeiro, não existindo, por isso, entrega do produto subjacente mas apenas a liquidação das margens correspondentes (ERSE, 2016).

2.3.2.1.4 Contratos de Opções

Os contratos de Opções, proporcionam a quem compra o direito, mas não a obrigação, de comprar ou vender energia, numa data futura ou durante um período acordado ou mediante um preço estipulado previamente.

No OMIP são negociados contratos que têm como ativo subjacente um contrato de Futuros possuindo o mesmo período de entrega deste. Estes podem ser do tipo *cal*, também designados por contratos de opção de compra, e contratos *put* que correspondem contratos de opção de venda.

Estes contratos são garantidos em retorno de um prémio. Ao contrário dos contratos de Futuros, que têm uma data de maturação, os contratos de Opções, são exercidos ou caducam (Rochete, 2015).

2.4 Caracterização do MIBEL

Estando em atividade desde 1 de julho de 2007, ao longo dos anos o MIBEL tem sofrido transformações, proporcionadas por uma evolução das condições que o influenciam. Seguidamente enunciam-se suas as principais características, descrevendo-se acontecimentos que influenciaram o desenvolvimento verificado.

2.4.1 Evolução dos preços de 2007 a 2014

Na Figura 2.11, verifica-se que o valor da energia total de aquisição casada no MIBEL e a energia total transacionada através de contratos bilaterais evoluiu tendo em conta as condições económicas dos países. O facto do início de funcionamento do MIBEL, ter ocorrido a 1 de julho de 2007, justifica a situação do volume de energia transacionada ser significativamente inferior aos anos seguintes (dados relativos a seis meses).

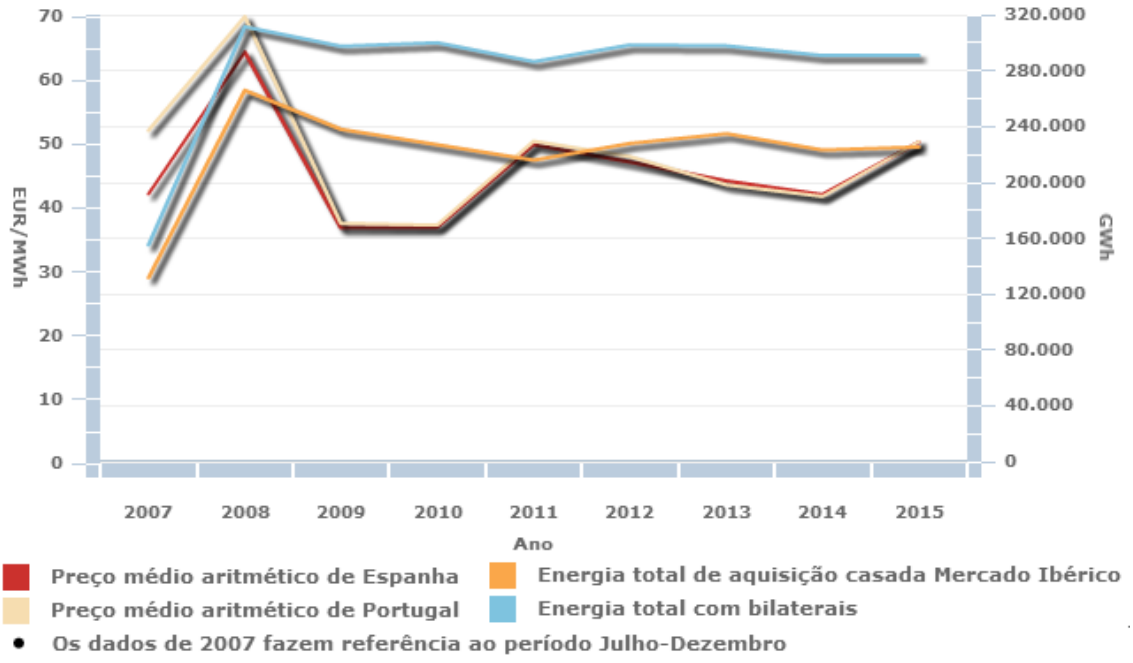


Figura 2.11 Valor do preço mínimo, médio e máximo casado – mercado diário (OMIE, 2016)

No ano de 2007, existiu uma diferença significativa entre o preço médio da energia transacionada em Portugal (52,17€) e em Espanha (42,19€). Ao longo dos anos, e em particular a partir do ano de 2009, o preço médio entre os dois países aproximou-se substancialmente.

Em 2014, o preço médio da energia elétrica transacionada no mercado diário em Portugal foi de 41,86€ e em Espanha 42,13€, uma diferença de 0,27€ entre os preços nos dois países. Esta disparidade é atualmente muito reduzida, se comparada com a que se verificou em 2007, ano em que se deu o início de funcionamento do MIBEL, em que houve uma diferença entre os preços da energia em Portugal e em Espanha de 9,98€.

Esta aproximação de preços é influenciada pela evolução da interligação entre os dois países, como se pode verificar na Figura 2.12, comparando com os anos de 2006 e 2009, nos anos 2012 e 2013 verifica-se um aumento acentuado na capacidade comercial de exportação no sentido Portugal/Espanha e no sentido Espanha/Portugal, acima dos 1500MW em 70% do ano.

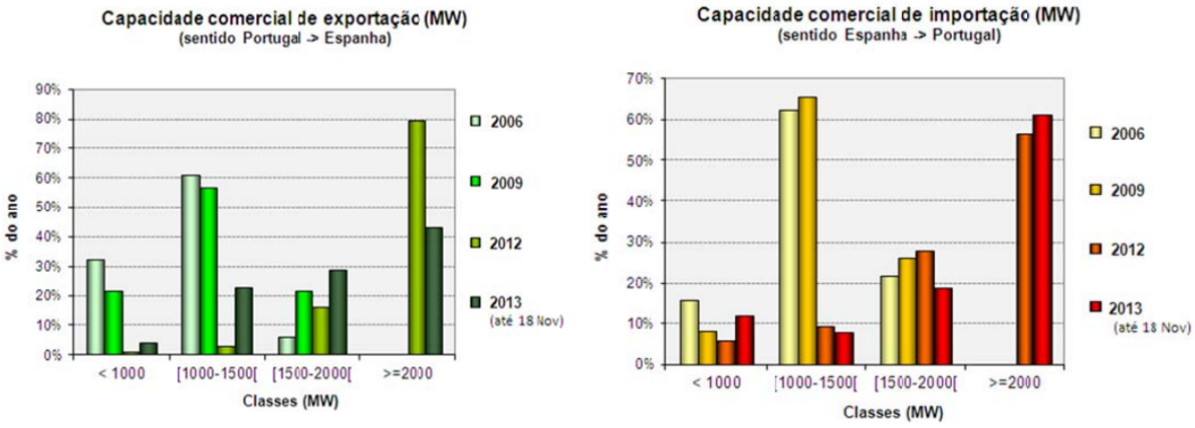


Figura 2.12 Evolução da capacidade comercial de exportação e importação (REN, 2013)

Na Figura 2.13, observa-se que com o aumento da capacidade de interligação, um aumento da integração dos mercados de Portugal e Espanha. Constata-se que a partir do ano de 2011, a separação entre os mercados não ultrapassou os 10%, este facto está relacionado com o aumento substancial da capacidade de interligação entre os dois países, como se pode verificar nas barras do gráfico

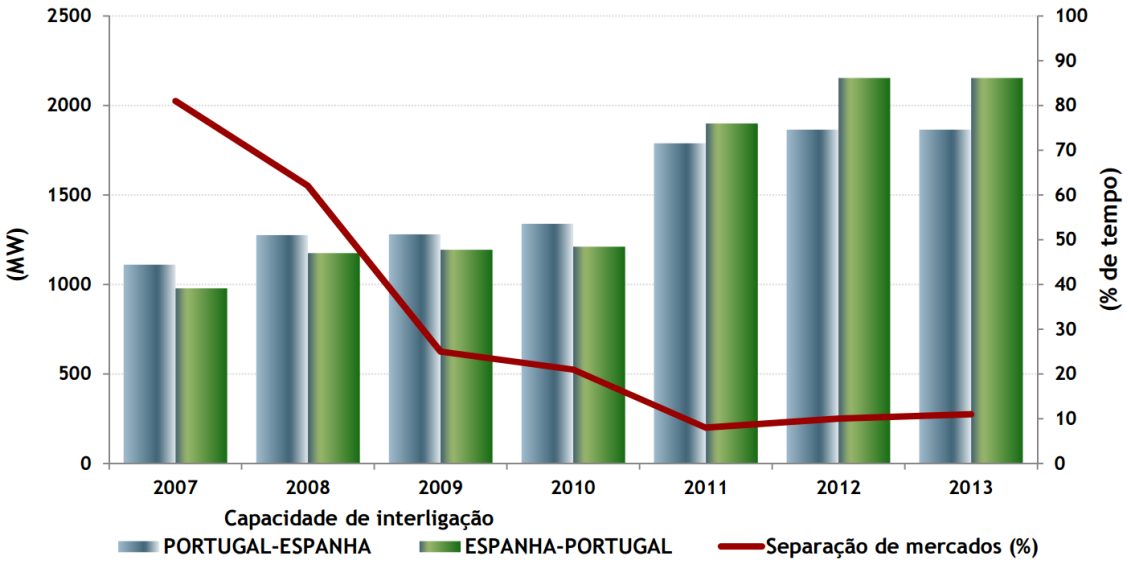


Figura 2.13 Evolução da separação dos mercados e da capacidade de interligação (Afonso, 2014)

2.4.2 Quantidade de energia transacionada por tecnologia

A energia elétrica negociada no MIBEL tem origem em fontes de diversas tecnologias de produção.

Atualmente no MIBEL é transacionada energia elétrica proveniente de centrais térmicas, nomeadamente centrais a gás de ciclo combinado, centrais a carvão e em centrais nucleares (existente apenas em Espanha); energia produzida em centrais hídricas; energia proveniente de origem internacional; e energia produzida em regime especial, PRE, que corresponde a energia produzida através de recursos endógenos, renováveis e provenientes de tecnologias de produção combinada de calor e de eletricidade - cogeração (ERSE, 2016).

Na Figura 2.14, é representada a quantidade de energia elétrica anual transacionada por cada uma das tecnologias presentes no mercado diário. Na Figura 2.15, é representada a percentagem de cada tecnologia na energia transacionada no mercado diário entre os anos de 2007 e 2015. É possível verificar que desde a entrada em funcionamento do MIBEL no ano de 2007, até ao ano de 2015, a quantidade de energia transacionada por tecnologia sofreu profundas alterações.

As centrais nucleares mantêm um nível de produção sensivelmente constante, este facto constitui uma exceção relativamente às outras fontes de produção.

A energia produzida através de PRE teve um forte crescimento, constituindo-se como a maior fonte de energia desde 2009, para este facto contribuiu o grande aumento de potência instalada em Portugal e em Espanha das tecnologias que a constituem.

A quantidade de energia produzida através de centrais hídricas varia conforme os anos. Este facto está fortemente relacionado com os índices de pluviosidade, uma vez que a produção através deste recurso está dependente de fenómenos meteorológicos. Estas variações têm um forte impacto nas quantidades de energia produzida através das centrais térmicas, uma vez que estas tecnologias de produção permitem o armazenamento do recurso de produção (que não é possível efetuar em grande parte das PRE, nomeadamente na energia eólica), de modo a satisfazer a procura em anos de baixa pluviosidade e fazer a compensação da energia habitualmente proveniente da produção das centrais hídricas.

No gráfico da Figura 2.14, também é possível verificar, que embora em 2015 tenha havido um aumento, há uma trajetória descendente ao longo dos últimos anos na quantidade de energia negociada, com origem em produção nas centrais de ciclo combinado.

A energia transacionada com proveniência internacional, de países que não pertencem à Península Ibérica (França e Marrocos) e a energia produzida com recurso de *fuel*, têm tido ao longo dos anos de funcionamento do MIBEL, uma expressão residual.

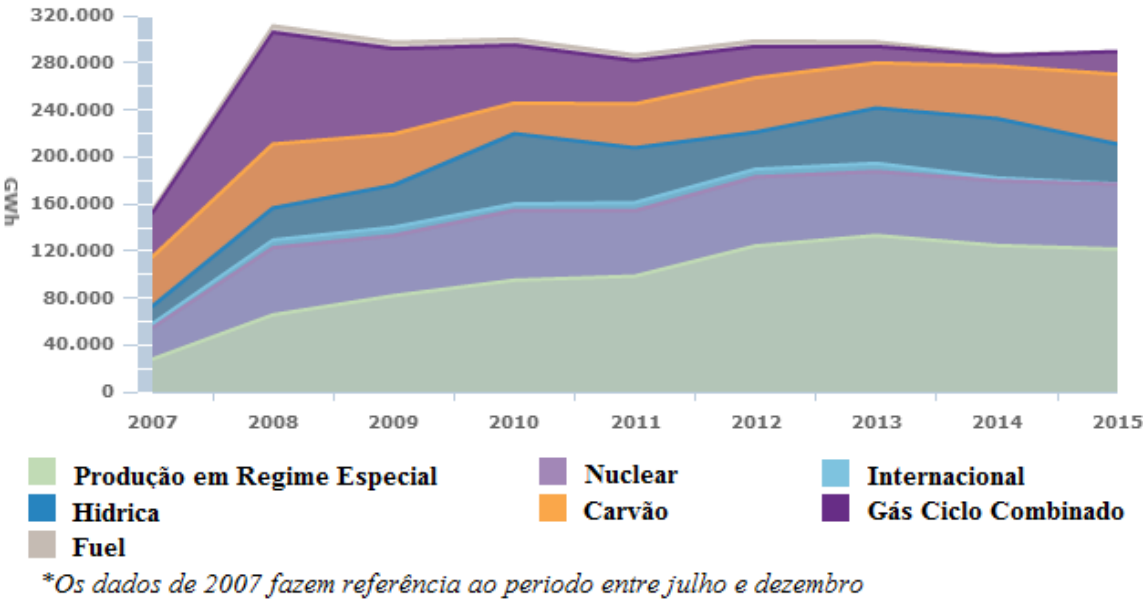


Figura 2.14 Energia anual transacionada por tecnologia no mercado diário (OMIE, 2016)

Na Figura 2.15, apresenta-se a percentagem de energia elétrica negociada no MIBEL, por cada uma das fontes de produção.



Figura 2.15 Energia transacionada no mercado diário, por tecnologia (OMIE, 2016)

Na Tabela 2.1, apresenta-se a quantidade de energia elétrica anual transacionada, no mercado diário do MIBEL, com discriminação da quantidade por tecnologia de produção. Nesta Tabela pode verificar-se que a quantidade total de energia transacionada ao longo dos anos tem sido constante (Os dados de 2007 dizem respeito ao período entre julho e dezembro, uma vez que o início de funcionamento do MIBEL ocorreu em 1 de julho de 2007).

O facto de não ter havido um aumento da procura, e consequentemente da energia transacionada, está relacionado com a ausência de crescimento da atividade económica em Portugal e Espanha, motivada pela crise financeira registada em 2008 e agravada em 2011. Outro motivo da estagnação do volume total da energia, é o aumento da eficiência energética, que permite a diminuição de consumos desnecessários de equipamentos e instalações.

Na Tabela 2.1, é ainda possível observar o crescimento acentuado da produção através de PRE, e verificar a grande variação na quantidade de energia produzida através da fonte hídrica e a forma como a quantidade de energia produzida através de centrais a carvão, varia inversamente à quantidade de energia produzida pelas centrais hídricas.

Observa-se também que a produção das centrais de ciclo combinado tem uma tendência descendente, e que a produção nuclear se mantém constante nos diversos anos. A energia proveniente de fonte internacional e *fuel*, têm uma relevância diminuta no total de energia produzida.

ANO	PRE (MWh)	NUCLEAR (MWh)	INTER. (MWh)	HÍDRICA (MWh)	CARVÃO (MWh)	C.COMB (MWh)	FUEL (MWh)	TOTAL (MWh)
2007*	*27 988*	*26 795*	*3 647*	*14 635*	*41 792*	*37 509*	*2 587*	***154 953***
2008	*65 575*	*57 032*	*6 799*	*27 210*	*54 135*	*95 235*	*5 510*	***311 496***
2009	*82 069*	*51 065*	*7 174*	*35 610*	*43 488*	*72 558*	*5 619*	***297 583***
2010	*95 034*	*59 447*	*5 476*	*59 842*	*25 947*	*49 461*	*4 980*	***300 187***
2011	*98 560*	*55 425*	*7 147*	*46 638*	*37 456*	*36 838*	*4 477*	***286 541***
2012	*124 169*	*58 881*	*6 581*	*31 204*	*46 331*	*26 754*	*4 569*	***298 489***
2013	*133 031*	*54 538*	*7 136*	*47 025*	*38 241*	*14 197*	*3 796*	***297 964***
2014	*124 728*	*55 215*	*2 063*	*50 606*	*44 511*	*9 266*	*550*	***286 939***
2015	*121 675*	*54 939*	*571*	*33 625*	*59 297*	*19 676*	*0*	***289 783***

Tabela 2.1 Energia anual transacionada por tecnologia no mercado diário (OMIE, 2016)

*Dados referentes a 6 meses, entre julho e dezembro.

Na Figura 2.16, é possível constatar que em 2015, que a produção em regime especial, com 42% do total da energia elétrica produzida, foi a maior fonte de energia elétrica transacionada no MIBEL.

As centrais térmicas a carvão com 20%, e as centrais nucleares com 19%, constituem-se como importantes tecnologias de base, cujas especificidades permitem uma grande fiabilidade, uma vez que é possível armazenar a matéria-prima para produzir energia elétrica, possibilitando a opção de produzir para satisfazer a procura.

A produção com recurso a centrais hídricas representou 12% do total da energia, um valor inferior ao habitual, justificado pela baixa pluviosidade registada em 2015. A produção com recurso a centrais de ciclo combinado representou 7% do total da energia, verificando-se um aumento em relação aos últimos anos, tendo funcionado em compensação do decréscimo da produção das centrais hídricas.

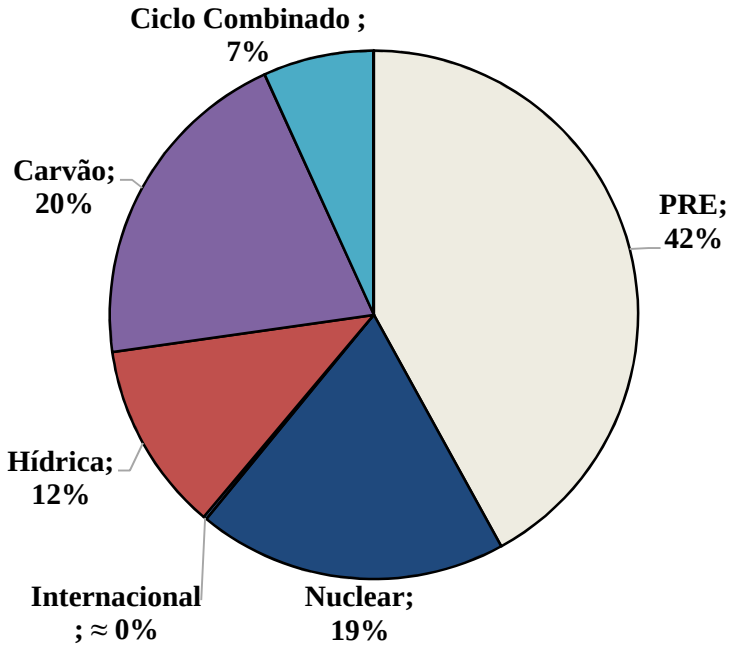


Figura 2.16 Energia transacionada no mercado diário, por tecnologia em 2015 (OMIE, 2016)

Desde o ano de 2009, que a PRE é a maior fonte de energia elétrica transacionada no MIBEL. O grande investimento feito em Portugal e em Espanha, por motivos económicos, politico-estratégicos e ambientais em fontes de produção de energia renovável, teve um contributo fundamental para esta alteração de paradigma.

O aumento da energia produzida a partir de recurso eólico, é o principal responsável pelo crescimento exponencial da quantidade de energia elétrica produzida através de PRE. O desenvolvimento tecnológico, possibilitou o fabrico de aerogeradores de potências mais elevadas, permitindo a diminuição dos custos de construção e tornando a energia eólica competitiva com outros meios de produção.

Na Figura 2.17, representa-se a evolução da potência instalada das diversas fontes de produção de energia renovável em Portugal entre 2004 e 2013. Nesta figura é possível observar que a energia eólica e energia hidrica representam uma grande preponderância no total da capacidade de fontes de produção de energia elétrica através de fontes renováveis.

A potência instalada de produção através de grandes centrais de tecnologia hidrica mantém-se sensivelmente constante. A ausência de investimento nos últimos anos em grandes centrais hidricas, pode ser justificado pelo facto, deste ser um meio de produção aproveitado há várias décadas e por esse motivo, já existir uma exploração das localizações mais favoráveis. Para além deste motivo, a construção de grandes barragens, requer investimentos avultados e tem implicações ambientais significativas.

A capacidade instalada das restantes fontes representadas, mantém-se relativamente constante, fundamentalmente devido à limitação de recurso e a elevados custos de construção.

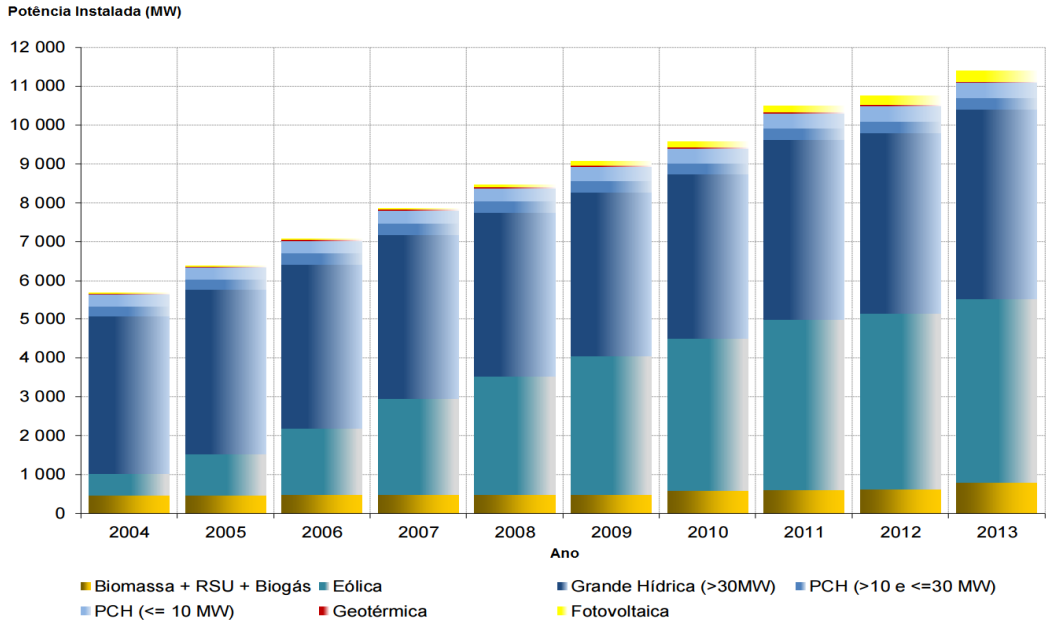


Figura 2.17 Evolução da potência instalada de energia renovável em Portugal (DGEG, 2015)

Na Figura 2.18, é representada a potência instalada das diversas fontes de produção interligadas à rede pública entre 2000 e 2014 em Portugal. Neste gráfico é possível verificar o crescimento acentuado da capacidade instalada de energia eólica.

Relativamente às restantes tecnologias observa-se que a capacidade instalada de produção a partir de fonte térmica fóssil, teve um aumento significativo entre 2008 e 2010, mas em 2011 iniciou uma tendência de descida até atingir em 2013, valores semelhantes aos verificados antes de 2008.

Entre os anos de 2011 e 2014, observa-se um ligeiro crescimento de potência instalada de produção através de fonte solar, apesar do potencial, dada a loalização do pais, é atualmente pouco significativa devido aos custos de construção das centrais de produção fotovoltaica, e à necessidade de grandes áreas para potências instaladas elevadas.

Nas restantes tecnologias, no periodo representado, a capacidade de produção manteve-se relativamente constante.

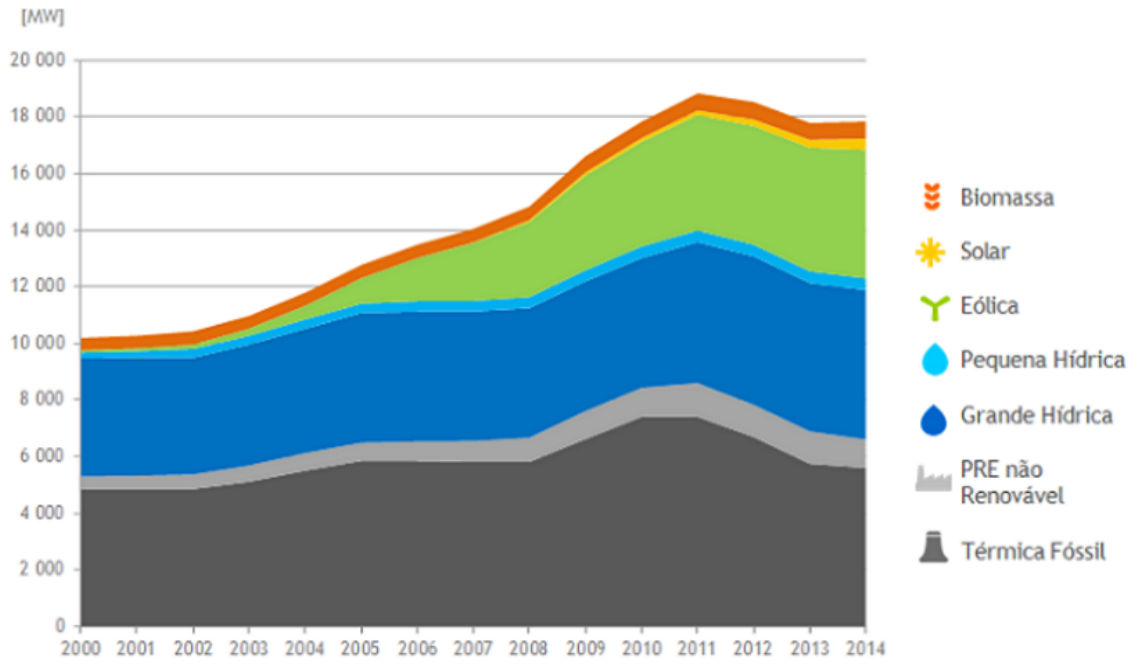


Figura 2.18 Evolução da potência instalada das fontes de produção em Portugal (APREN, 2016)

Nas Figuras 2.19 e 2.20 são apresentados dois gráficos com a evolução da capacidade instalada em energia eólica. Nos últimos 15 anos há um enorme crescimento deste tipo de tecnologia, atingindo no conjunto perto de 28 000MW de potência instalada, 5 000MW em Portugal e 23 000MW em Espanha.

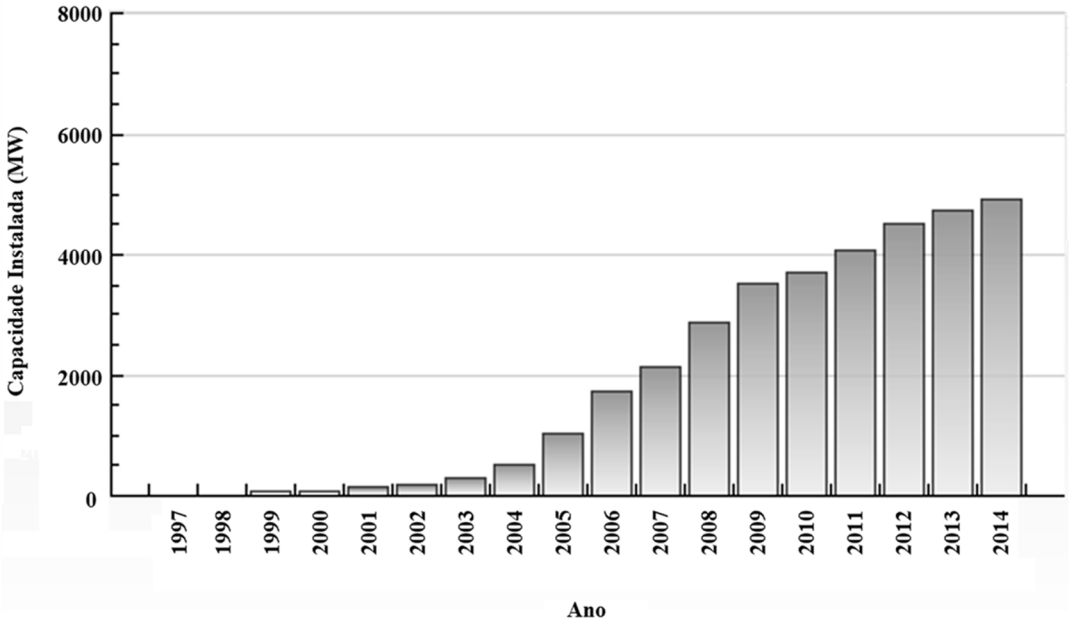


Figura 2.19 Evolução da potência instalada de energia eólica em Portugal (Windpower, 2015)

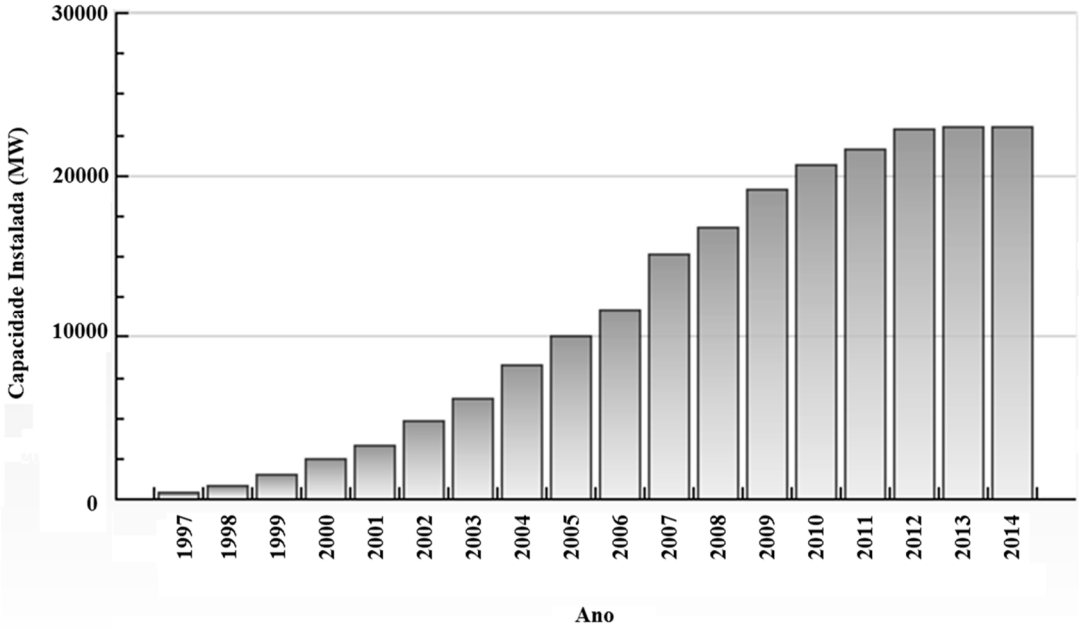


Figura 2.20 Evolução da potência instalada de energia eólica em Espanha (Windpower, 2015)

Capítulo 3 – Análise de dados circulares

Este capítulo contém uma introdução à análise de dados circulares. São referenciados outros trabalhos, onde se utilizam este tipo de metodologia. Por fim, apresentam-se métodos aplicados em estatística de dados circulares, incluindo testes de uniformidade.

3 - Análise de dados circulares

3.1 Introdução

Os métodos de estatística circular têm sido utilizados em diversas áreas, em que se verificam ocorrências aleatórias de natureza cíclica, nomeadamente: na astronomia, demografia, geologia, geografia, meteorologia, biologia entre outras.

Sendo possível aplicar estes métodos a diversos tipos de dados, interessa destacar dois grupos, que pelas suas características, são propícios à sua utilização, direções e ciclos temporais.

A aplicação pode ser feita a dados de observações de direções, em que a utilização da estatística circular é executada tendo como referência os pontos cardeais da rosa-dos-ventos, e os dados são medidos com recurso a bússolas, ou outros métodos análogos.

Exemplo disso são diversos estudos efetuados no campo da ornitologia, ramo da biologia que se dedica ao estudo das aves. Em Bergin (1991), é analisada a orientação de ninhos, com recurso a métodos de estatística circular, para a determinação de padrões da orientação dos ninhos.

Outro tipo de dados para os quais os métodos de estatística circular são adequados, são os dados de ciclos temporais, nomeadamente ciclos diários, semanais e anuais, em que a análise em geral é feita com recurso ao relógio como instrumento primordial de medição (Mardia & Jupp, 2000).

É importante distinguir casos em que o tempo é considerado como uma variável linear contínua, em que o recurso a modelos de séries temporais será mais apropriado, dos casos em se analisam ocorrências que se repetem ciclicamente, em que a estatística circular se apresenta como uma boa opção (Gill & Hangartner, 2010).

Brunsdon e Corcoran (2005), analisam a hora de ocorrência de crimes em *Cardiff*, no País de Gales, pesquisando-se padrões que se repetem ciclicamente em ciclos diários. Este tipo de estudo pode ser utilizado como ferramenta de apoio na organização dos meios das forças policiais, assim como na prevenção de ocorrência de crimes e distúrbios.

A estatística circular também pode ser aplicada à produção de energia elétrica. Dada a imprevisibilidade do comportamento do recurso eólico para produção de eletricidade, é de extrema importância aprofundar o conhecimento do seu comportamento, por forma a prevê-lo.

Através da aplicação de métodos de estatística circular, Martins et al. (2015) caracterizam e comparam as distribuições da produção máxima diária observada em seis parques eólicos localizados em diferentes regiões do território português.

3.2 Métodos de estatística circular

Em estatística circular uma observação, que corresponde a uma determinada direção, pode ser representada através de um ponto numa circunferência de raio unitário, ou de um vetor unitário. Na Figura 3.1 representa-se o ponto P. Trata-se de um ponto da circunferência de raio unitário, que corresponde a uma observação.

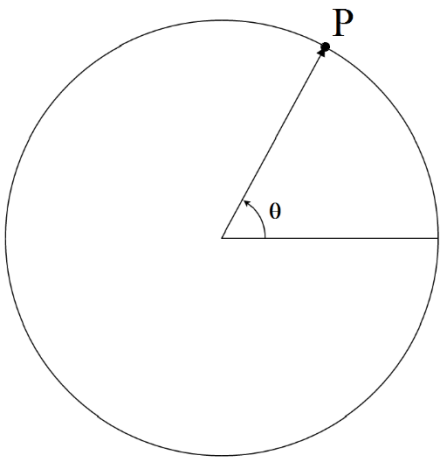


Figura 3.1 Circunferência de raio unitário e medição de ângulo

A utilização de métodos estatísticos lineares em dados circulares pode resultar em interpretações absurdas. A definição arbitrária do ponto de origem (ponto 0º no circulo) e a possibilidade de medição de dados de forma bidirecional pode conduzir a resultados discordantes com a realidade (Jammalamadak & SenGupta, 2001).

Por exemplo uma observação de 45º e um ângulo de 135º, conforme representado na Figura 3.2, pode ser interpretada como tendo no sentido dos ponteiros do relógio uma desfasagem de 90º, ou no caso de se considerar o sentido contrário ao dos ponteiros do relógio uma desfasagem de 270º.

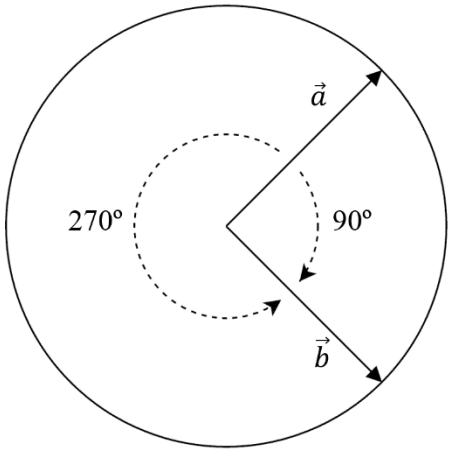


Figura 3.2 Definição do sentido de rotação

Assim, é fundamental identificar o ponto de origem, e definir a orientação da direção dos dados. Uma vez definida a direção inicial (origem) e a orientação, a observação pode ser representada pelo ponto P, sendo que θ, representa um ângulo, desde a direção inicial e estando o ponto P contido numa circunferência de raio unitário, pode ser definido através de coordenadas polares (1, θ) ou através de coordenadas cartesianas (cos θ, sen θ). A observação pode ser definida por θ, e ser medida em graus, ou radianos.

Para se definir a direção média, numa circunferência de raio unitário, podíamos ser tentados a calcular a média aritmética dos ângulos. No entanto, analisando o exemplo apresentado anteriormente nesta secção, o desvio da direção da observação $\vec{b}$ em relação à direção da observação $\vec{a}$, adquire valores maiores, ou menores, dependente da escolha da direção do zero e do sentido de rotação que seja definido (Jammalamadak & SenGupta, 2001).

Analisando o exemplo de cálculo da média dos ângulos 15º e 345º, recorrendo a métodos de estatística linear, fazendo uma média aritmética, teríamos:

$$\text{média aritmética} = \frac{345° + 15°}{2} = 180° \qquad (3.1)$$

Este facto pode ser constatado na Figura 3.3, onde se pode verificar que o cálculo da média aritmética, que normalmente é utilizada para dados lineares, não faz sentido como medida de "centro/ponto de equilíbrio" para dados circulares. Para o cálculo do valor da variância, que depende da média, verifica-se o mesmo problema.

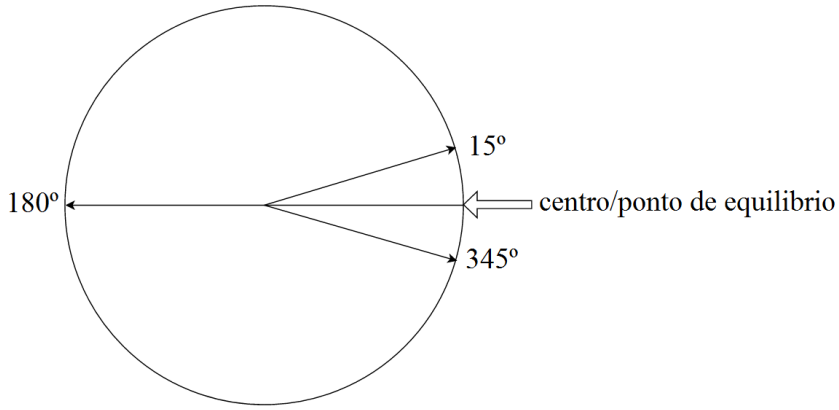


Figura 3.3 Média aritmética

Uma medida com significado e apropriada à determinação de uma direção média para direções, é obtido através do tratamento de dados como vetores unitários e utilizando a direção do vetor resultante.

Seguidamente são apresentados métodos de estatística circular, que têm em consideração as características especificas deste tipo de dados, por forma a conduzir a resultados válidos.

3.2.1 Vetor resultante

Considerando que $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ são observações de dados circulares, que representam ângulos, e consequentemente direções. Conforme se pode identificar na Figura 3.4, a direção θ_i, pode ser expressa através das coordenadas cartesianas do ponto $P_i = (\cos\theta_i\,, \operatorname{sen}\theta_i)$, sendo este um ponto na circunferência de raio unitário.

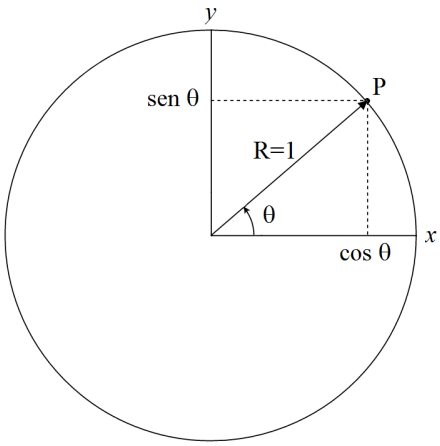


Figura 3.4 Vetor resultante

Se fizermos a conversão das coordenadas polares para coordenadas retangulares, para cada uma das observações, e considerando que:

$$(\cos\theta_i\,, \operatorname{sen}\theta_i),\ i = 1, \dots, n \qquad (3.2)$$

Podemos definir que estas, correspondem também às coordenadas do vetor $\vec{P_i} = (\cos\theta_i\,, \operatorname{sen}\theta_i)$.

O vetor resultante os n vetores unitários correspondentes, a soma das suas componentes:

$$\vec{R} = (\sum_{i=1}^{n} \cos\theta_i\ , \sum_{i=1}^{n} \sin\theta_i\ ) = (C, S) \qquad (3.3)$$

3.2.2 Média circular

Considerando $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$, a amostra de dados circulares. As coordenadas centro de gravidade $(\bar{C}, \bar{S})$, onde $\bar{C}$ e $\bar{S}$ são a média das coordenadas de x e y, respetivamente, onde:

$$\bar{C} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \cos\theta_i \qquad \bar{S} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \sin\theta_i \tag{3.4}$$

A media angular, $\bar{\theta}$ é definida pelo ângulo do vetor $(\bar{C}, \bar{S})$:

$$\bar{\theta} = \begin{cases} arctang\left({}^{S}/_{C}\right), & se\ C > 0,\ S \geq 0 \\ arctang\left({}^{S}/_{C}\right) + 2\pi, & se\ C > 0,\ S < 0 \\ arctang\left({}^{S}/_{C}\right) + \pi, & se\ C < 0 \\ {}^{\pi}/_{2}, & se\ C = 0,\ S > 0 \\ {}^{3\pi}/_{2}, & se\ C = 0,\ S < 0 \\ não\ definida, & se\ C = 0,\ S = 0 \end{cases} \tag{3.5}$$

Sendo $arctang$ a função arcotangente que é a função inversa da tangente.

Uma vez que $(\bar{C}, \bar{S}) = \frac{1}{n} \times \vec{R}$, a direção do vetor $(\bar{C}, \bar{S})$ é identica ao vetor $\vec{R}$.

Aplicando ao exemplo apresentado na secção 3.2, em que $\theta_1 = 15°$ e $\theta_2 = 345°$

$$(\bar{C}, \bar{S}) = (0{,}965926; 0)$$

$$\bar{\theta} = arctang(0) = 0°$$

3.2.3 Mediana circular

A Mediana circular, $\tilde{\theta}$, dos ângulos $\theta_1, \dots, \theta_n$ é um ângulo $\emptyset$, que satisfaz as seguintes condições (Mardia & Jupp, 2000):

- Metade dos dados estão no arco $[\emptyset, \emptyset + \pi]$;
- E a maioria dos dados estão mais próximos de $\emptyset$ do que de $\emptyset + \pi$.

Quando o número de amostras, n, é ímpar, a mediana é um dos dados da amostra.

Quando o tamanho da amostra n é par, a mediana é o ponto médio entre dois pontos adjacentes.

3.2.4 Quartis

Os quartis são medidas de localização que dividem a amostra ordenada de dados de tipo quantitativo ordenada, em quatro partes, cada uma com uma percentagem de dados aproximadamente igual.

O 1º quartil, ou quartil inferior representado por Q1 (ou $Q_{0,25}$) e o 3º quartil ou quartil superior, representado por Q3 (ou $Q_{0,75}$) são medidas que localizam alguns pontos da distribuição dos dados de tal forma que aproximadamente 25% dos dados são inferiores ou iguais a Q1, aproximadamente 25% dos dados são superiores ou iguais a Q3 e os restantes dados, aproximadamente 50%, situam-se entre Q1 e Q3.

De um modo geral, quando nos referimos aos quartis, estamos a referir-nos ao 1º e 3º quartis, uma vez que o 2º quartil corresponde à mediana.

3.2.5 Variância circular

O comprimento da média resultante, $\bar{R}$, é o comprimento do vetor $(\bar{C}, \bar{S})$, cujo valor está compreendido em [0,1]. Valores elevados de $\bar{R}$, correspondem a menor dispersão de dados. Se $\bar{R} = 1$, todos os dados (direções) são coincidentes.

Ou seja sendo:

$$\theta_1 = \theta_2 = \cdots = \theta_n = \theta$$

$$\bar{C} = \cos\theta \qquad \text{e} \qquad \bar{S} = \text{sen}\,\theta$$

então

$$\bar{R} = \sqrt{\cos\theta^2 + \text{sen}\,\theta^2} = 1 \qquad (3.6)$$

A Variância Circular pode ser definida por (Fisher, 1993):

$$V = 1 - \bar{R} \qquad (0 \leq V \leq 1) \qquad (3.7)$$

Habitualmente são utilizados indicadores de dispersão cujo valor aumenta com a dispersão. Assim, faz sentido considerar que quanto maior o valor de V, mais dispersa é a distribuição.

3.2.6 Intervalo de variação circular - range

O intervalo de variação circular é o comprimento do menor arco, do circulo que contêm todos valores da amostra (Mardia & Jupp, 2000).

$$\omega = 2\pi - T,\ T = maxT_i \qquad 1 \leq i \leq n \quad (3.8)$$

Uma vez que ω indica um agrupamento de observações, a hipótese de unformidade é rejeitada para valores de ω baixos.

3.2.7 Desvio padrão circular

O desvio padrão circular é obtido através de (Mardia & Jupp, 2000):

$$\vartheta = \sqrt{-2ln\bar{R}} \qquad (3.9)$$

À semelhança do caso linear, o desvio padrão circular toma apenas valores positivos e não existe limite superior.

3.3 Distribuições - uniforme e de Von Mises

Existem dois tipos de distribuições que devem ser consideradas, quando se faz uma análise através de métodos de estatística circular.

A distribuição circular uniforme reflete o caso em que todas as direções estão igualmente distribuídas ao longo do círculo. A probabilidade de ocorrência é dispersa uniformemente, a distribuição circular uniforme pode ser obtida por:

$$f(\theta) = \frac{1}{2\pi}, \qquad 0 \leq \theta < 2\pi \qquad (3.10)$$

No caso em que a distribuição não é uniforme, existe a possibilidade da distribuição ter alguma concentração em uma (unimodal) ou mais (multimodal) direções preferenciais. A distribuição unimodal mais comum é a distribuição circular normal, também conhecida por distribuição de Von Mises:

$$f(\theta; \mu, \vartheta) = \frac{1}{2\pi I_0(\vartheta)} e^{\vartheta \cos(\theta - \mu)}, \quad 0 \leq \theta < 2\pi \qquad (3.11)$$

onde $0 \leq \mu < 2\pi$ e $\vartheta \geq 0$ são os parâmetros e

$$I_0(\vartheta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{\vartheta \cos\theta} d\theta = \sum_{r=0}^{\infty} \left(\frac{\vartheta}{2}\right)^{2r} \left(\frac{1}{r!}\right)^2 \qquad (3.12)$$

Em estatística circular a distribuição Von Mises tem um significado semelhante ao da distribuição normal na estatística linear. Esta distribuição tem uma forma semelhante à distribuição normal, exceto as pontas que tem forma truncada (Martins, 2015).

Quando se analisam dados circulares é importante verificar se os dados seguem uma distribuição uniforme, o que significa que existe uma região modal (ou regiões) nos dados. Para além disso, diversos métodos paramétricos em estatística circular requerem uma distribuição Von Mises. Assim, torna-se importante verificar se os dados seguem este tipo de distribuição.

Na secção 3.3.1, são apresentados testes para aferir se a amostra em estudo é uniforme ou se segue uma distribuição Von Mises. Estes testes foram aplicados ao caso de estudo.

3.3.1 Teste de uniformidade e Von Mises – teste de Watson

Num teste estatístico existem duas hipóteses em alternativa, relativas a um parâmetro desconhecido da população (Martins, 2015):

- H_0: Hipótese nula - considerada verdadeira ao longo do procedimento do teste até ao momento em que haja evidência estatística clara apontando em sentido contrário.
- H_1: Hipótese alternativa

O sentido da decisão é baseado na informação disponível, obtida a partir de uma mostra, e é tomado de acordo com o facto de existirem motivos para rejeitar, ou não a hipótese nula. No caso de se rejeitar a hipótese nula, H_0, aceita-se como válida a hipótese alternativa.

Foram aplicados testes de Watson (Jammalamadak & SenGupta, 2001), com o objetivo de verificar se os dados das horas em que se atingem os preços máximos diários, têm uma distribuição uniforme ou se seguem uma distribuição de Von Mises.

O teste de Watson compara a distribuição empírica, com uma distribuição de referência, sendo a hipótese a distribuição dos dados é igual à distribuição de referência. A hipótese alternativa em que a distribuição dos dados da amostra não coincide com a distribuição de referência (Martins, 2015).

3.3.1.1 Teste de Watson – Uniformidade

A aplicação do teste de Watson, para verificar se os dados da distribuição é uniforme, segue a seguinte metodologia:

Definem-se as hipóteses:

H_0: A amostra provém de uma população com distribuição uniforme

H_1: A amostra não provém de uma população com distribuição uniforme

Identifica-se o nível de significância:

$\propto = 1\%$

Verifica-se se existe uniformidade de acordo com:

- $pvalue < \propto$, rejeita a hipótese H_0, conclui-se que amostra não foi retirada de uma população com distribuição uniforme

- $pvalue > \propto$, não rejeita a hipótese H_0, conclui-se que a amostra foi retirada de uma população com distribuição uniforme

3.3.1.2 Teste de Watson – Von Mises

A aplicação do teste de Watson, para verificar se os dados da distribuição é Von Mises, segue a seguinte metodologia:

Definem-se as hipóteses:

H_0: A amostra provém de uma população com distribuição Von Mises

H_1: A amostra não provém de uma população com distribuição Von Mises

Identifica-se o nível de significância:

$$\propto = 1\%$$

Verifica-se se existe uniformidade de acordo com:

- $pvalue < \propto$, rejeita a hipótese H_0, conclui-se que amostra não foi retirada de uma população com distribuição Von Mises

- $pvalue > \propto$, não rejeita a hipótese H_0, conclui-se que a amostra foi retirada de uma população com distribuição Von Mises

Capítulo 4 – Aplicação ao MIBEL

Este capítulo contém uma apresentação do caso de estudo, em que são aplicados métodos de estatística circular a dados do MIBEL. É identificada a origem dos dados e descrita a metodologia desenvolvida. Por fim são apresentados os resultados.

4 - Aplicação ao MIBEL

4.1 Introdução

A globalização, o aumento da população mundial e o desenvolvimento de países emergentes, estão a alterar o paradigma do setor da energia. O aumento exponencial das necessidades de consumo, resulta na escassez de recursos do planeta, e está atualmente a provocar alterações climáticas, que têm como possível consequência, o aumento de catástrofes naturais e o crescimento de grandes movimentos migratórios de populações afetadas por estas alterações. Para além disso, a depêndencia energética, coloca em causa a soberania e defesa dos estados.

A energia elétrica, pela sua versatilidade, facilidade de transformação e pelas suas múltiplas aplicações, e sobretudo pela possibilidade de produção através de fontes renováveis, tem cada vez mais, um papel fundamental no setor energético. Assim, torna-se de extrema importância, aprofundar o conhecimento do setor da energia elétrica, saber o modo como variam os preços, e identificar o que os influência.

O presente estudo teve como principal objectivo modelar acontecimentos cíclicos em mercados de energia elétrica, utilizando métodos de estatística circular. Para obtenção de resultados foi utilizado o ambiente *R* (2014), para o desenvolvimento de programas, que foram uma ferramenta essencial para o tratamento dos dados.

Para além do código de programação desenvolvido, foram utilizados os *packages CircStats* e *Circular*, para executar métodos de estatística circular, incluíndo testes de Watson para verificar a uniformidade e aferir se os dados provêm de uma distribuição Von Mises.

Os resultados obtidos com recurso ao *R*, foram depois organizados, recorrendo ao *software Microsoft Office – Excel* (2013), permitindo agrupar os dados, na aplicação de métodos de estatística circular e na elaboração de gráficos circulares.

A execução dos gráficos circulares, foi feita com recurso a programa desenvolvido no *software Matlab* (2014).

Este estudo foi desenvolvido definindo dois períodos em cada ano: 1º trimestre com dados dos meses janeiro, fevereiro e março; e 3º trimestre com dados dos meses de

julho, agosto e setembro, com o objetivo de contrapor condições meteorológicas (índices de pluviosidade, vento e temperatura) e socioeconómicas (períodos em que maioritariamente as populações em Portugal e Espanha têm férias, alterando os hábitos de consumo de energia), extremas e cíclicas, e saber se essas alterações influenciam a oferta e a procura de energia elétrica, e a hora a que se verifica o preço máximo diário no MIBEL.

Inicialmente estudou-se o comportamento dos preços máximos diários, procurando encontrar padrões que se repetem. Através de uma pesquisa, foi feita uma comparação entre os dados de Portugal e Espanha, analisou-se a evolução entre anos e foi feita uma comparação em dois períodos, 1º e 3º trimestre.

Na segunda parte analisaram-se dados de produção de energia elétrica, por tecnologia e dados de procura, com o objetivo de identificar padrões que justifiquem a hora em que ocorrem os preços máximos da energia.

4.2 Estudo dos preços máximos diários no MIBEL

Na primeira fase deste trabalho, foram objeto do estudo, os preços máximos diários atingidos no MIBEL. Esta análise tem como finalidade, aprofundar o conhecimento do comportamento dos preços extremos, por forma a encontrar padrões e compreender a evolução dos mesmos, ao longo dos anos.

Para além da pesquisa de elementos que podessem infuenciar os preços máximos da energia negociada no MIBEL, pretende-se comparar os valores entre Portugal e Espanha, e verificar se existe uma uniformização do mercado ibérico.

4.2.1 Origem dos dados - preços máximos diários

Os dados para a elaboração do estudo, foram os preços horários de energia elétrica em €/MWh, em Portugal e Espanha, que se verificaram no MIBEL (MIBEL, 2016) entre 1 de julho de 2007 e 30 de setembro de 2014. Os dados foram posteriormente agrupados, em períodos de três meses, tendo o estudo incidido conforme se especifica na secção

4.2.2, no 1º e 3º trimestre, que correspondem aproximadamente aos meses de verão e de inverno, em cada um dos dois países.

Verificando-se a existência de dias com duração diferente de 24 horas (dois dias anuais em que ocorre a mudança de hora), considerou-se uma adaptação no calendário, por forma a que todos os dias tenham o mesmo número de horas.

Assim os dias de mudança de hora, em que se atrasou uma hora, ou seja dias com 25 horas, foi suprimida a última hora, não tendo sido considerada no presente estudo. Nos dias em que se adiantou uma hora, ou seja dias com 23 horas, considerou-se que o valor da hora última hora é estimada a partir da média do valor da última hora diária e da primeira hora do dia seguinte.

4.2.2 Metodologia

Para elaboração da presente dissertação, toma-se em consideração os valores da hora em que os preços máximos diários da energia elétrica foram atingidos, em Portugal e Espanha.

Com recurso ao *software R*, foi criado um programa para encontrar a hora a que foram atingidos os preços máximos diários da energia elétrica, e o valor a que foi transacionada em Portugal e Espanha.

Na Figura 4.1, exemplifica-se o método utilizado para representação dos ciclos. Para a representação gráfica, os 360º de uma circunferência são divididos ao longo das 24 horas diárias (em 15 parcelas, cada uma corresponde a uma hora), sendo a direção inicial as 0 horas e a orientação no sentido horário, permitindo uma análise visual intuitiva, semelhante à que se faz para ver as horas num relógio de ponteiros.

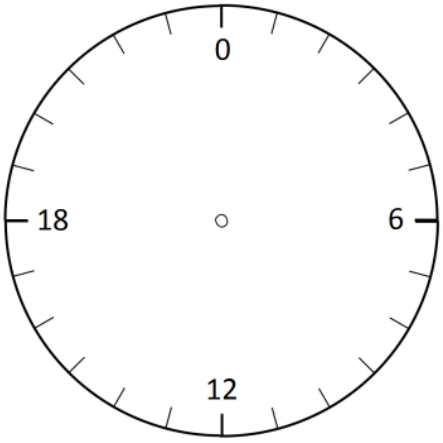


Figura 4.1 Representação horária

A partir dos gráficos circulares, procuraram-se padrões de comportamento, tendo por base uma dimensão temporal diária.

A pesquisa de repetição de comportamentos foi feita do seguinte modo: em primeiro lugar foi definido o período a estudar (anualmente, mensalmente, trimestralmente, etc…); seguidamente identificou-se a hora a que eram atingidos os preços máximos diários em cada período; posteriormente construíram-se gráficos circulares, e por fim, através de uma análise visual procuraram-se elementos que se repetiam.

Após análise dos resultados dos estudos realizados com os diversos períodos, os dados relativos aos valores máximos dos dois países, foram agrupados, para cada um dos anos separadamente, em dois conjuntos, valores máximos diários verificados no 1º trimestre do ano, que inclui os meses de janeiro, fevereiro e março, e os valores máximos diários no 3º trimestre do ano, que inclui os meses de julho, agosto e setembro.

A escolha destes períodos, 1ºs trimestres e 3ºs trimestres, foi feita tendo em conta as condições dos países em estudo, e teve como objetivo, estudar o comportamento em períodos em que ocorrem variações meteorológicas económicas e socioculturais, que afetam o consumo e produção de energia elétrica, afetando as horas a que se atingem os valores máximos diários.

4.2.3 Número de observações (n)

O número de observações é o número de ocorrências do valor máximo diário, nos períodos definidos, 1º trimestre e 3º trimestre.

Foram consideradas repetições nos valores máximos diários, ou seja, quando o valor máximo ocorreu em mais do que uma hora no mesmo dia.

Assim, tomando como exemplo os valores de mercado para Portugal no dia 2 de julho de 2007, apresentada na Tabela 4.1, verifica-se que o valor máximo, de 59,00€/MWh, foi atingido quatro vezes neste dia.

HORA	PREÇO (€/ MWh)
01:00	*50,50 €*
02:00	*41,36 €*
03:00	*39,87 €*
04:00	*39,87 €*
05:00	*25,20 €*
06:00	*25,20 €*
07:00	*26,06 €*
08:00	*31,00 €*
09:00	*35,90 €*
10:00	*38,82 €*
11:00	*50,50 €*
12:00	*57,00 €*
13:00	*58,00 €*
14:00	***59,00 €***
15:00	*58,00 €*
16:00	*58,00 €*
17:00	***59,00 €***
18:00	***59,00 €***
19:00	***59,00 €***
20:00	*58,00 €*
21:00	*57,00 €*
22:00	*52,00 €*
23:00	*51,50 €*
24:00	*54,00 €*

Tabela 4.1 Preços da energia no mercado diário (MIBEL, 2016)

Para o presente estudo foram consideradas quatro ocorrências do valor máximo em Portugal no dia 2 de julho de 2007, sendo considerado o mesmo método para os outros dias.

Nas Tabelas 4.2 e 4.3, pode verificar-se o número de ocorrências de valores máximos diários, em cada um dos países e em cada um dos períodos definidos anteriormente, nomeadamente no 1º e no 3º trimestre de cada ano.

PERIODO	ANO	Nº DE DIAS DO PERIODO	Nº DE MÁXIMOS	
			PORTUGAL	ESPANHA
1º trimestre	2008	91	*107*	*106*
	2009	90	*97*	*97*
	2010	90	*102*	*100*
	2011	90	*107*	*106*
	2012	91	*104*	*103*
	2013	90	*101*	*98*
	2014	90	*106*	*106*

Tabela 4.2 Número de preços máximos diários no 1º trimestre entre 2008 e 2014

PERIODO	ANO	Nº DE DIAS DO PERIODO	Nº DE MÁXIMOS	
			PORTUGAL	ESPANHA
3º trimestre	2007	92	*129*	*109*
	2008		*107*	*106*
	2009		*105*	*99*
	2010		*106*	*107*
	2011		*118*	*113*
	2012		*105*	*107*
	2013		*110*	*107*
	2014		*112*	*112*

Tabela 4.3 Número de preços máximos diários no 3º trimestre entre 2007 e 2014

É possível aferir que o número de ocorrência de máximos, nem sempre é coincidente entre os dois países, assim como varia ao longo dos anos, e trimestre, uma vez que o número de máximos diários não é constante.

No 3º trimestre de 2007, existe uma grande diferença entre o número de máximos que ocorreram em Portugal e Espanha, este tipo discrepância entre número de máximos não se verifica nos últimos anos do período estudado. Este facto pode estar relacionado a uma menor ocorrência de situações de *market splitting*, indiciando uma integração efetiva dos setores elétricos dos dois países num mercado único.

4.2.4 Representação gráfica

Na Figura 4.2, apresenta-se um gráfico linear, com os preços máximos diários verificados na energia transacionada em Portugal no MIBEL, durante o 3º trimestre de 2014. Neste histograma representa-se a frequência dos preços máximos diários, observados em cada hora (identificando-se a quantidade no topo das barras).

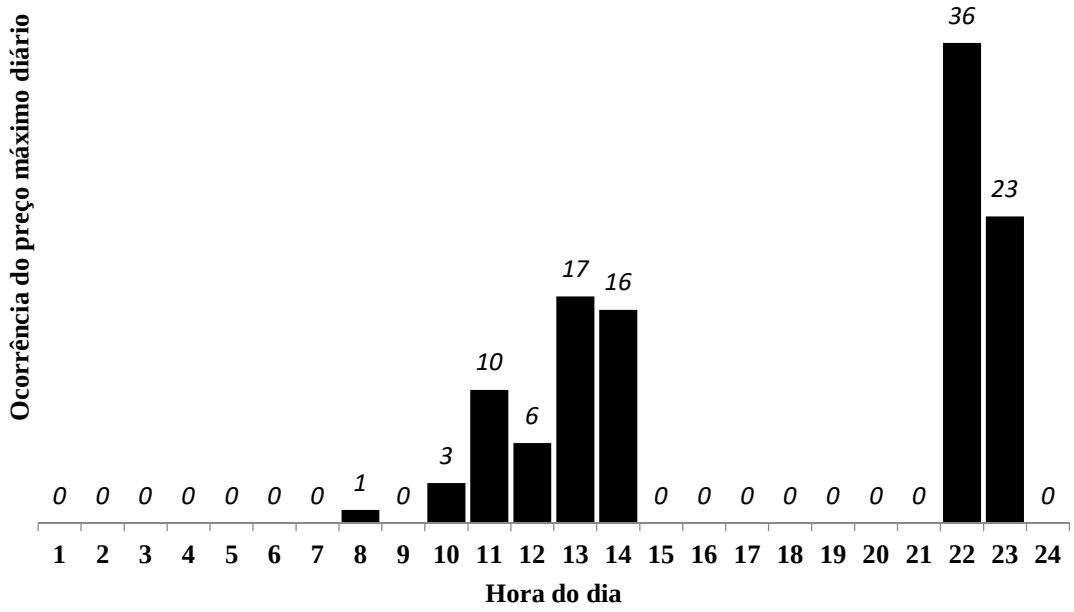


Figura 4.2 Histograma linear das horas dos preços máximo diários – 3º trimestre de 2014, em Portugal

Se se fizer uma rotação no histograma, de modo a que à 24ª hora se siga a 1ª hora, obtém-se um gráfico circular conforme mostra na Figura 4.3. Este tipo de gráfico permite representar acontecimentos cíclicos de forma a possibilitar uma análise visual, com uma interpretação intuitiva.

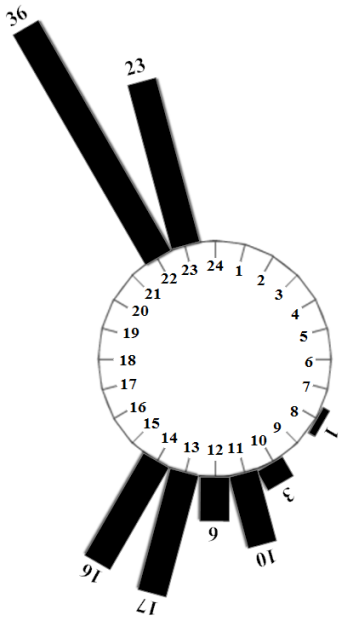


Figura 4.3 Gráfico circular das horas dos preços máximo diários – 3º trimestre de 2014, em Portugal

Tendo em consideração um raciocínio semelhante, a partir dos dados das horas a que se registaram os valores máximos diários, foram criados gráficos circulares, conforme Figura 4.4, onde se representa o valor máximo diário, na respetiva hora do dia a que ocorre.

Estes gráficos foram elaborados, com recurso a programa desenvolvido no *software Matlab*. Nesta representação gráfica circular, é possível identificar a frequência da ocorrência do preço máximo diário em determinada hora, durante o período definido.

Para além de ser possível observar as horas em que se verificou o preço mais elevado em cada dia, podem também identificar-se os valores máximos atingidos através de um código de cores, de 0 a 100€/MWh, com intervalos de 20€/MWh de cores diferentes. Os preços acima de 100€/MWh, são representados com a mesma cor.

Estes intervalos foram definidos a partir de uma análise através de gráficos de dispersão elaborados com o *software Microsoft Office – Excel (2013)*, para os diversos períodos em estudo, de forma a haver uma representação gráfica dos vários preços, que permitisse diferenciar as várias observações, mantendo a representação facilmente legível e compreensível de forma intuitiva.

As cores dos gráficos são dispostas de forma gradativa crescente. As cores que correspondem a valores mais baixos dos preços máximos diários, ficam mais próximos do centro da circunferência, em relação às cores que representam valores mais elevados.

No exemplo apresentado na Figura 4.4, apresenta-se um gráfico circular relativo aos preços máximos diários da energia elétrica transacionada no MIBEL, atingidos no 3º trimestre de 2014 em Portugal.

Neste gráfico circular o triângulo de maior dimensão representado às 22:00, equivale ao intervalo modal, e corresponde a mais de 30% dos preços máximos diários verificados durante o trimestre de 2014. Neste período, existem outros intervalos proeminentes, nomeadamente: às 23:00, com 20% das ocorrências; outros dois intervalos modais relevantes ocorreram às 13:00 e 14:00, com sensivelmente 15% cada, do total dos preços máximos diários; às 11 horas também se observa um intervalo substancial, relativo a 10% dos preços máximos diários. Os restantes preços máximos ocorreram às 12:00 e às 10:00.

Representados na Figura 4.4, com a cor amarela, os preços máximos atingidos foram maioritariamente entre valores maiores os iguais a 60 €/MWh, e inferiores a 80€/MWh. Os restantes máximos, representados no gráfico circular com a cor azul claro correspondem a preços máximos com valores entre 40 €/MWh e 60 €/MWh.

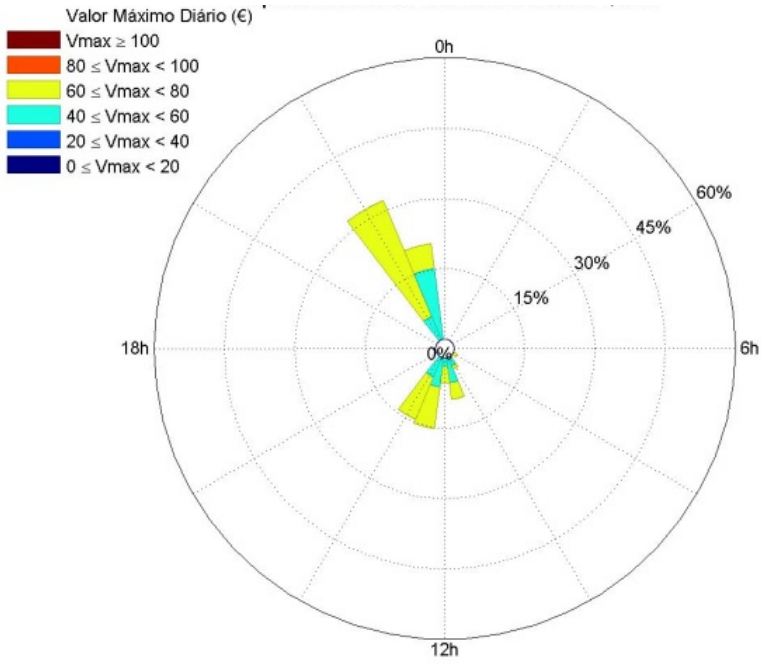


Figura 4.4 Frequência das horas dos preços máximo diários – 3º trimestre de 2014, em Portugal

4.3 Análise de resultados – estudo dos preços máximos

Na realização deste trabalho, foram criados gráficos circulares, com o objetivo de efetuar uma análise visual do comportamento verificado nos preços máximos diários da energia transacionada no MIBEL, entre os anos de 2007 e 2014, em Portugal e em Espanha.

Para além da frequência da hora em que é verificado o preço máximo em cada dia, os gráficos incluem também, através de um código de cores, o intervalo de valores do preço máximo atingido diariamente.

4.3.1 Análise de gráficos circulares – preços máximos

Na secção 4.3.1 estuda-se o comportamento do valor, e da frequência da hora em que se atinge o preço máximo diário, através do estudo de semelhanças e diferenças entre gráficos circulares. A análise comparativa dos gráficos é feita em 4.3.1.1 entre os dados de Portugal e Espanha; seguidamente em 4.3.1.2 é feita entre dois períodos temporais, 1º trimestre e 3º trimestre; e por fim em 4.3.1.3 analisa-se a evolução dos valores dos preços máximos e da hora em que ocorrem, ao longo dos anos entre 2007 e 2014.

4.3.1.1 Comparação entre Portugal e Espanha

Na Figura 4.5 apresentam-se gráficos circulares dos preços máximos diários atingidos em Portugal e em Espanha, durante o 1º trimestre de 2014.

Nestes gráficos, é possível observar a frequência em percentagem, da hora em que diariamente ocorre o valor máximo da energia elétrica, em cada um dos países, e o valor do preço máximo a que foi transacionada.

Na inspeção visual dos gráficos relativos aos preços máximos diários atingidos em Portugal e em Espanha em períodos análogos, pode constatar-se que ambos têm aspeto semelhante. Nos dois gráficos da Figura 4.5, os intervalos modais ocorrem às mesmas horas, e os preços máximos diários atingidos nesses intervalos têm valores idênticos. O facto de se verificar um comportamento idêntico nos dois países, dá-se devido aos dois mercados estarem integrados

No 1º trimestre de 2014, em mais de 75% do total das ocorrências dos preços máximos diários, a hora a que são atingidos os preços máximos é entre as 20:00 e as 22:00. Também se observa que nos dois os países, a hora do dia em que se negoceia a energia elétrica no MIBEL a um preço mais elevado, com maior frequência é às 21:00, sendo que em Portugal este comportamento é mais acentuado do que em Espanha. Em Portugal em mais de 30% do total das horas em que ocorre o valor máximo diário, o preço máximo é atingido às 21:00.

Examinando os valores máximos diários atingidos, observa-se que em Portugal e em Espanha, na maioria das observações, estes valores são inferiores a 60€/MWh. Apesar de ser um acontecimento menos frequente, também é possível identificar situações em que os preços atingem valores mais elevados durante o período noturno, conforme as horas em que existe maior consumo de energia elétrica, neste período. Em Portugal, são atingidos valores superiores a 100€/MWh às 22:00, e em Espanha o mesmo acontece às 20:00 e 22:00.

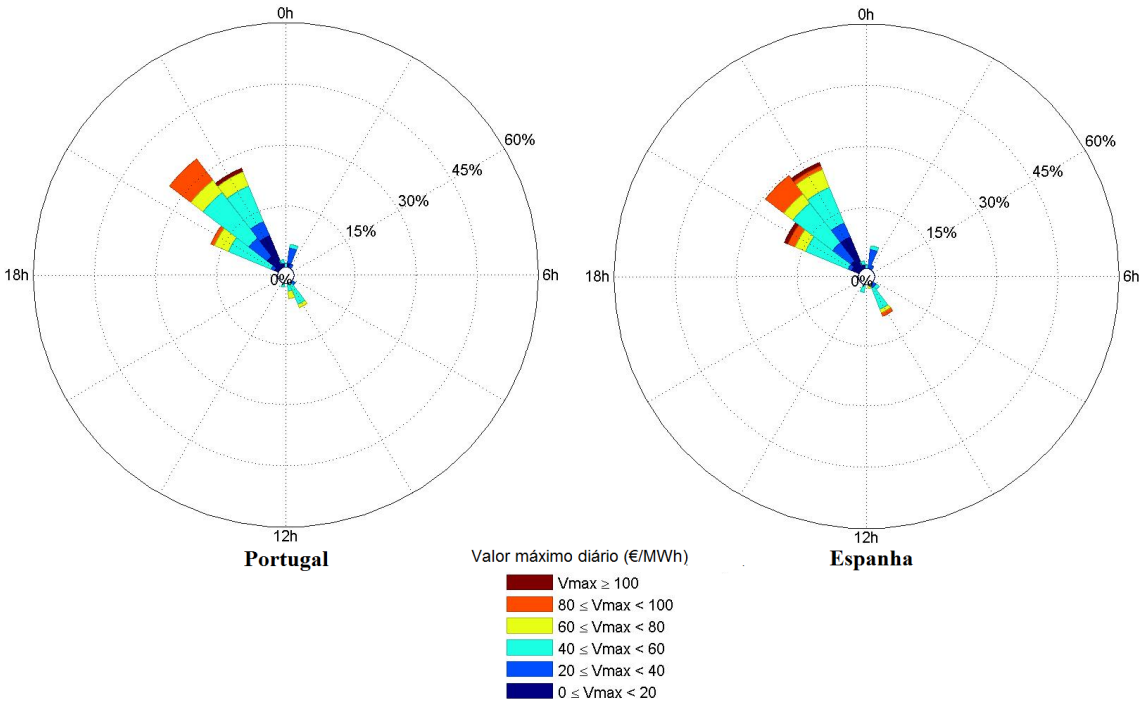


Figura 4.5 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre de 2014, em Portugal e Espanha

Na Figura 4.6 apresentam-se gráficos circulares dos preços máximos em Portugal e Espanha no 3º trimestre de 2013. Os gráficos neste período, à semelhança do que acontece no 1º trimestre de 2014, também apresentam uma forma idêntica, o que indica

que os preços máximos são atingidos sensivelmente com a mesma frequência, às mesmas horas do dia.

A hora em que se atinge o preço máximo diário, mais frequente é às 14:00, aproximadamente 30% das vezes. Também foi frequente, mais de 15% das observações, a ocorrência do valor máximo, às 22:00.

Quanto ao valor dos preços máximos praticados, estes estão compreendidos entre 40€/MWh e 80€/MWh, e verifica-se que acontecem de forma semelhante em ambos os gráficos.

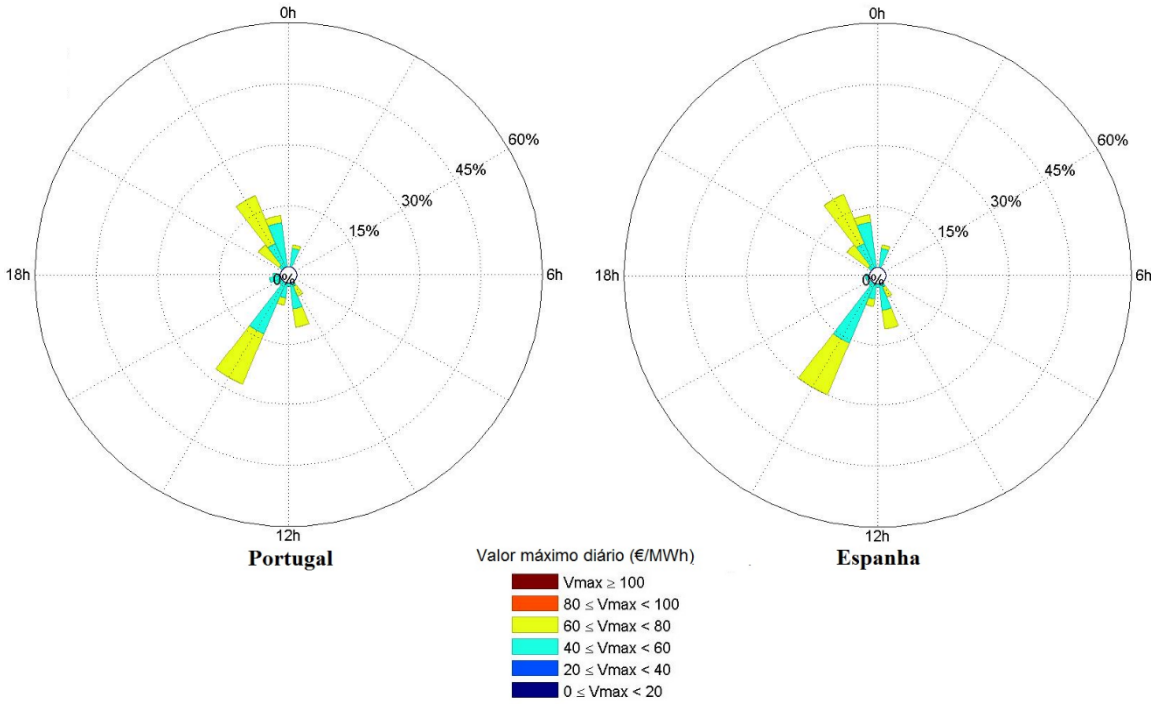


Figura 4.6 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 3º trimestre de 2013, em Portugal e Espanha

No período em estudo, entre 2007 e 2014, embora com algumas exceções, de um modo geral pode dizer-se que o comportamento dos preços máximos diários, em relação à hora em que ocorrem, e no valor atingido, em períodos análogos, é semelhante em Portugal e em Espanha. Esta constatação pode ser verificada através de inspeção visual dos gráficos circulares apresentados nos anexos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

O facto de se verificar que os máximos ocorreram repetidamente às mesmas horas e com valores muito idênticos em Portugal e em Espanha, é esperado e ratifica a condição do MIBEL integrar os mercados de ambos os países.

A semelhança de comportamento dos preços máximos diários atingidos nos dois países, sugerem que não é comum verificar-se *market splitting* nas horas em que se atingem os preços máximos diários nos períodos em estudo, validando o MIBEL como um mercado ibérico único, nestas situações.

4.3.1.2 Comparação de preços máximos entre o 1º e 3º trimestre

Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, apresentam-se gráficos circulares relativos aos valores do preço máximo diário, e a frequência em percentagem da hora em que é atingido em Portugal em dois períodos, no 1º trimestre e no 3º trimestre, entre os anos de 2007 e 2014.

Por inspeção visual dos gráficos do 1º trimestre é possível verifica-se que os preços máximos ocorrem em mais de 50% das observações, entre as 20:00 e 22:00. Este tipo de comportamento repete-se ao longo dos anos, observando-se também que nos preços máximos diários atingidos em Espanha (os gráficos circulares análogos, correspondentes aos preços máximos atingidos em Espanha, não se apresentam na secção 4.3.1.2, uma vez que os intervalos modais, são idênticos aos verificados nos preços máximos atingidos em Portugal, conforme indicado na secção 4.3.1.1. A similitude deste comportamento pode ser confirmada com a inspeção visual dos gráficos circulares apresentados em nos anexos 5, 6, 7 e 8).

Também é possível observar de forma repetida ao longo dos anos, que existem dias, durante o período relativo ao 1º trimestre em que os preços máximos atingidos são superiores a 80€/MWh.

A repetição nos 1ºs trimestres entre 2007 e 2014, da ocorrência de intervalos modais entre as 20:00 e 22:00, assim como o facto de a energia ser transacionada a preços elevados em alguns dias do período, constitui um padrão de comportamento, e é coincidente com as horas em que existe maior procura.

Por comparação, observa-se no 3º trimestre, um comportamento diferente do que ocorre no 1º trimestre. No trimestre com dos meses de verão, os preços máximos são

atingidos, tanto no período noturno, como no período da tarde, este fenómeno ocorre ao longo dos anos em Portugal e em Espanha (como se pode observar nos anexo 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8).

Nos gráficos circulares dos preços máximos diários verificados em Portugal, apresentados nas Figura 4.7, 4.8 e 4.9 entre os anos de 2008 e 2014 (os gráficos circulares relativos aos dados de Espanha são similares aos gráficos correspondentes aos dados de Portugal em período análogo, como se pode observar no nos anexos 5, 6, 7 e 8), é possível observar repetidamente, intervalos modais às 13:00 e às 14:00.

Esta situação é particularmente visível nos anos entre 2008 e 2014 em que, para além de se atingirem preços máximos em horas noturnas como acontece nos 1ºs trimestres analisados, os intervalos modais sucedem-se tendencialmente entre as 13:00 e as 14:00. No ano 2014 os preços máximos foram atingidos às 22:00 e 23:00, no entanto também existem intervalos modais de dimensões relevantes às 13:00 e 14:00.

Como se observa nos gráficos circulares deste período, as observações são representadas nas cores amarela e azul claro, o que indica que entre os anos de 2009 e 2014, nos dias relativos ao 3º trimestre, os máximos atingidos não ultrapassam 80€/MWh.

No 3º trimestre do ano 2008 verifica-se a exceção a este padrão de comportamento. Nesse ano os preços máximos diários foram maioritariamente superiores a 80€/MWh. Este acontecimento está relacionado com os baixos índices de pluviosidade registados nesse ano em Portugal e em Espanha, que impediram a produção de energia elétrica nas centrais hídricas em grandes quantidades. Em 2008 a capacidade de produção de energia elétrica a partir de PRE, era pouco significativa, pelo que a satisfação da procura, que normalmente era feita com as centrais hídricas, foi feita com recurso centrais com custos de produção mais elevados, nomeadamente através de centrais a gás de ciclo combinado. Para além do facto da energia elétrica ser gerada através de fontes com custos de produção mais elevados, as regras de mercado da oferta e da procura foram responsáveis pela subida de preços.

Assim, verificando-se a manutenção da mesma procura de energia elétrica, e a capacidade de armazenamento de recurso para produção, por parte dos operadores que se constituíam como principais agentes em 2008, nomeadamente as centrais térmicas, estes agentes tiveram oportunidade de vender energia elétrica a preços elevados.

A evolução verificada na capacidade instalada, que corresponde ao crescimento acentuado de produção com recurso as tecnologias de PRE, constituindo-se atualmente como uma das principais fontes do total da energia produzida, com especial relevância da energia eólica, em que não é possível armazenar o recurso de produção, contribui para o facto da subida dos preços máximos diários não se verificar atualmente nos anos em que existe um baixo índice de pluviosidade e menos produção através de centrais hídricas.

O comportamento do valor do preço máximo diário atingido no 1º trimestre e 3º trimestre é diferente. As horas e os valores máximos atingidos são influenciados pelas horas e as quantidades em que se atinge a máxima procura de energia elétrica em Portugal e em Espanha.

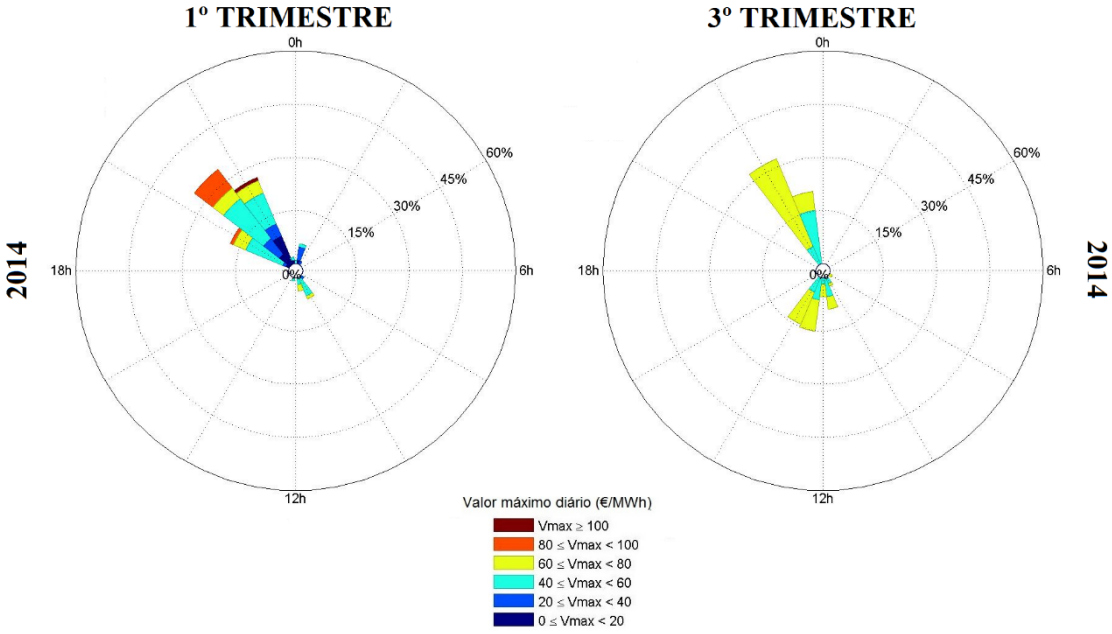


Figura 4.7 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre do ano de 2014, em Portugal

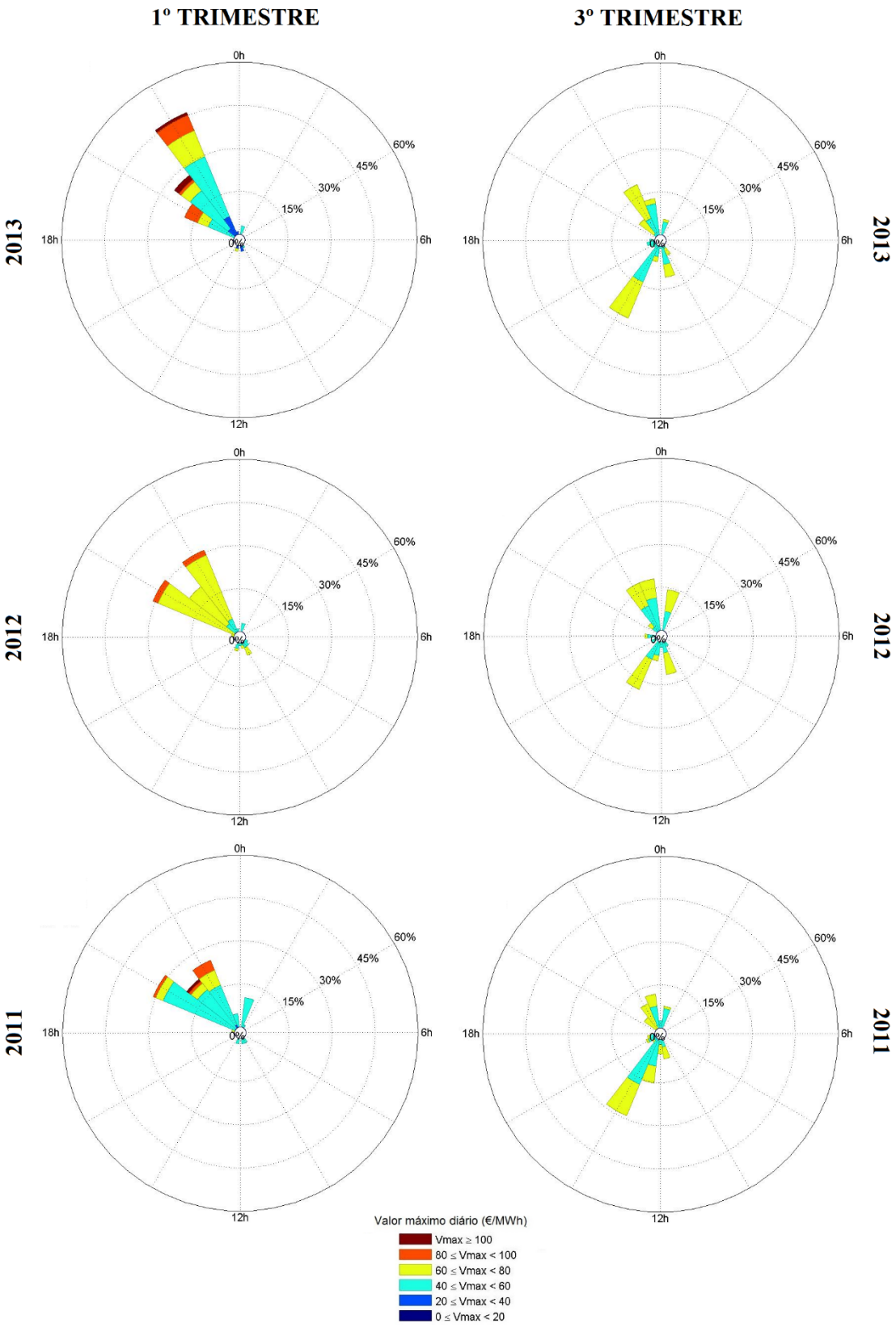


Figura 4.8 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre, entre 2013 e 2011, em Portugal

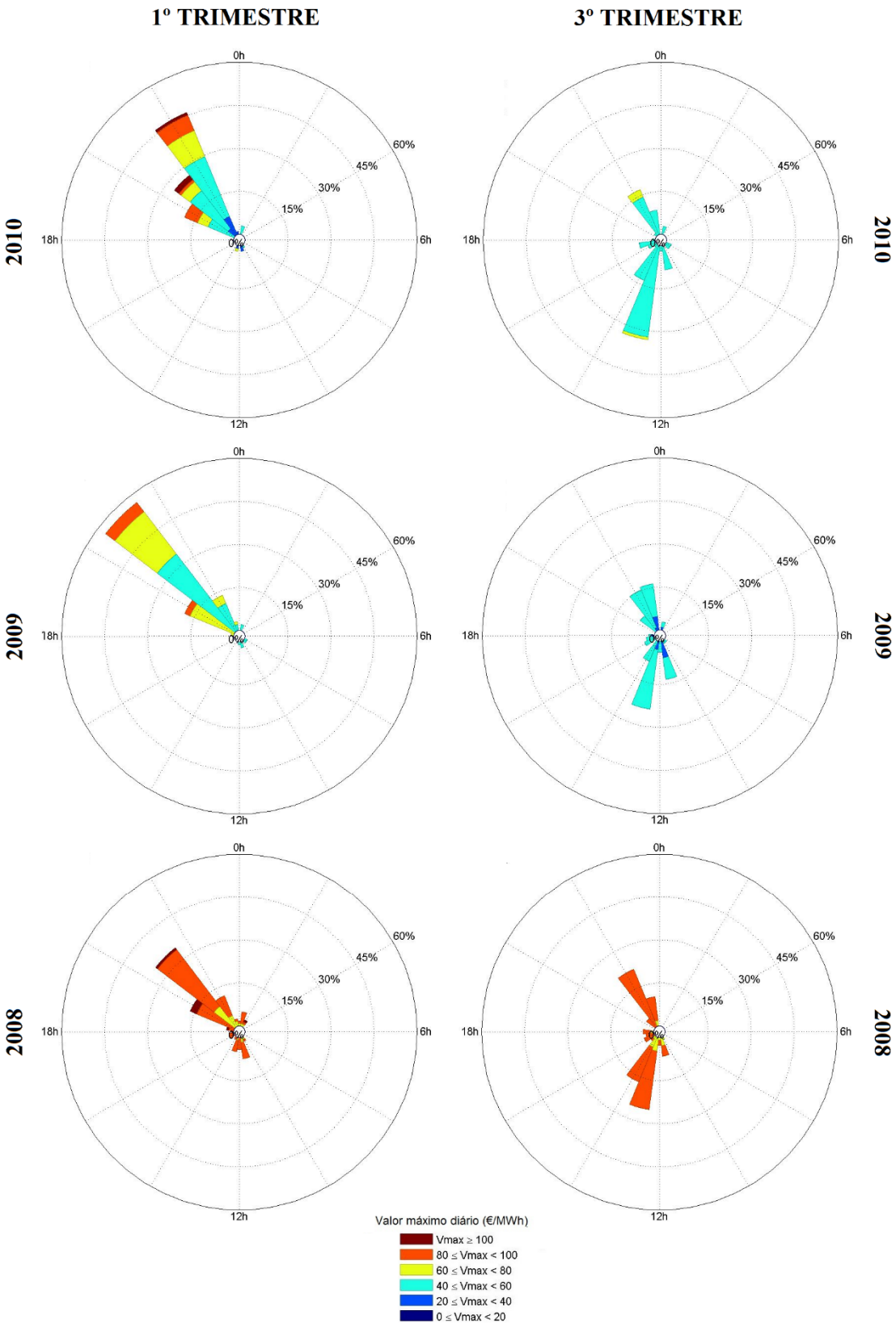


Figura 4.9 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre, entre 2008 e 2010, em Portugal

4.3.1.3 Análise da evolução dos preços máximos diários

Nas Figuras 4.10, 4.11, apresentam-se representações gráficas circulares dos preços máximos diários, da energia transacionada em Espanha, nos 1ºs trimestres entre 2008 e 2014 (não são apresentados os gráficos nos períodos análogos para Portugal, devido a terem características idênticas, que podem ser observadas nos anexos 1 e 2).

Nos diversos anos representados, pode observar-se a ocorrência de máximos diários em diversas horas. No entanto, verifica-se de forma recorrente no período representado que predominantemente os máximos diários, estão entre as 20:00 e 22:00, esta situação está relacionada com as horas em que ocorre maior procura de energia no mercado.

Por inspeção dos gráficos circulares da hora em que se verifica o valor máximo de procura diário nos 1ºs trimestres (conforme apresentado nos anexos 1, 2, 5 e 6), observa-se repetidamente em todos os anos do estudo, uma concentração de máximos diários, em Portugal às 20:00 e em Espanha às 22:00.

Entre 2008 a 2010 verificou-se a existência de um intervalo modal de frequência, de grandes dimensões, o que corresponde a uma elevada concentração de máximos diários na mesma hora, nos anos de 2008 e 2009 mais de 40% dos máximos ocorreu às 21:00, e em 2010 às 22:00. Entre os anos de 2011 e 2014 observa-se que os intervalos modais ocorrem às 20:00 e às 22:00.

Assim pode constatar-se que até ao ano de 2009 os preços máximos em Portugal e em Espanha, estava discretamente relacionado com a procura no próprio país, e que a partir de 2010 há uma evolução para a hora a que se atingem os preços máximos diários passaram a ser influenciados pelo país vizinho.

Este acontecimento está associado ao desenvolvimento da integração dos dois países num mercado único, originado pela melhoria da interligação entre Portugal e Espanha, que permite uma maior capacidade de exportação da energia elétrica e um menor número de horas em que ocorre o mecanismo de *market splitting*.

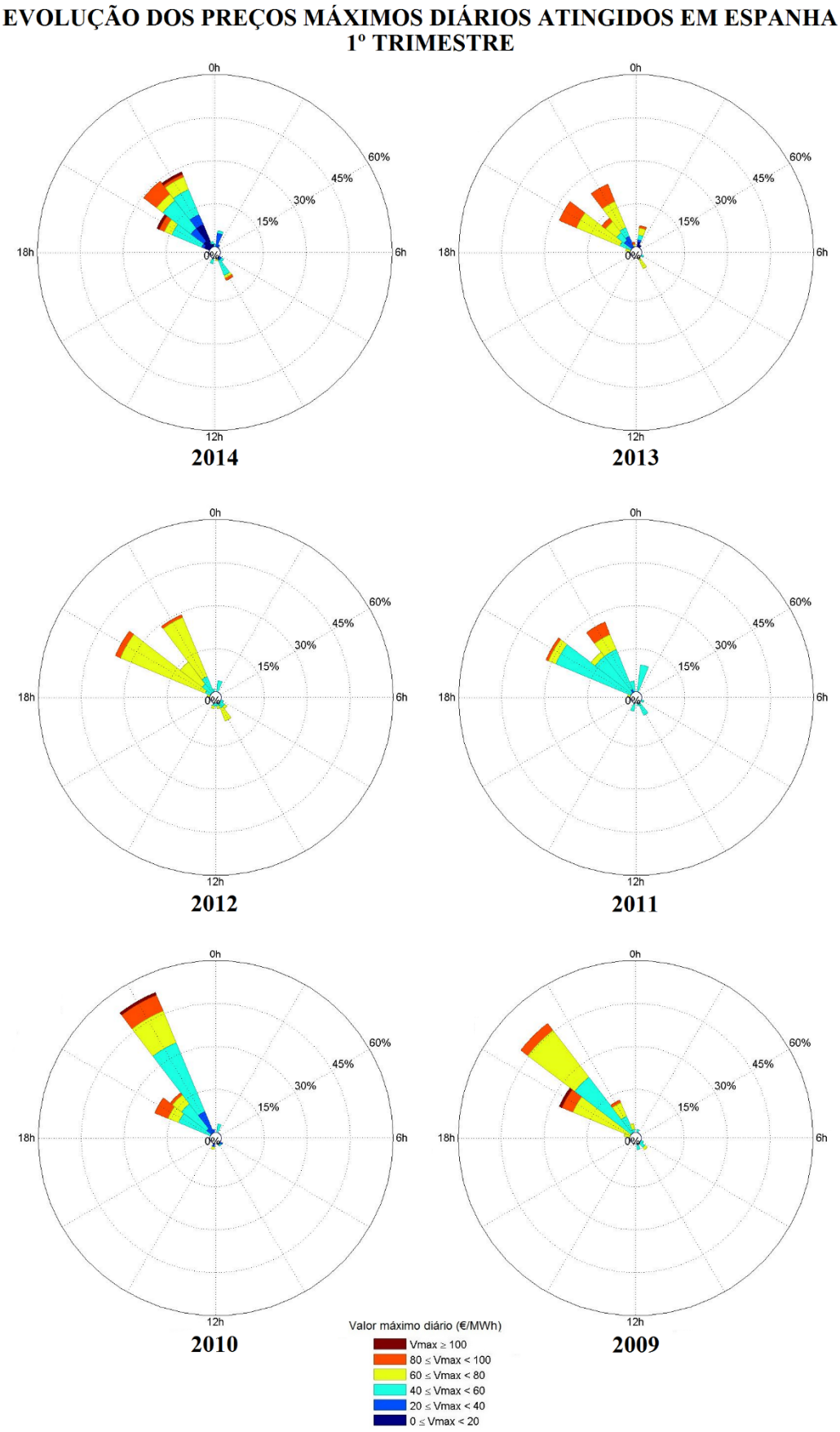


Figura 4.10 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre entre 2009 e 2014, em Espanha

Nestes gráficos, pode verificar-se que em todos os anos do MIBEL até 2014, ocorreram máximos acima 80€/MWh no 1º trimestre.

A ocorrência de preços elevados verifica-se com maior evidência no ano de 2008, em que as observações estão representadas com as cores amarelo, cor de laranja e vermelho, ou seja os preços máximos diários, da energia transacionada, estão sempre acima de 60€/MWh, sendo a cor predominante o laranja, o que indica que na maior parte dos valores máximos foram acima dos 80€/MWh, este facto está relacionado com a baixa quantidade de energia produzida nas centrais hídricas e com a capacidade das diversas tecnologias e preponderância que tinham no total da energia produzia, conforme descrito na secção 4.3.1.2.

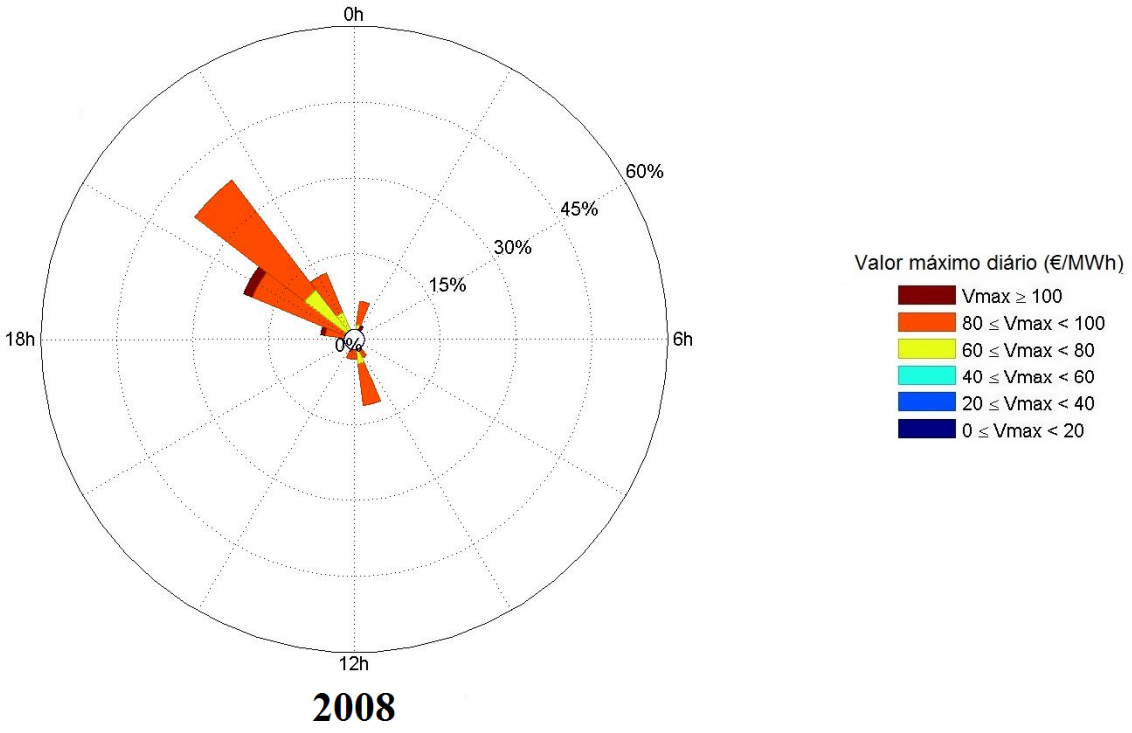


Figura 4.11 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 1º trimestre de 2008, em Espanha

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são representados os gráficos circulares dos preços máximos atingidos no MIBEL em Espanha, no 3º trimestre de 2007, ano em que o mercado de energia elétrica entrou em funcionamento até ao ano de 2014 (não são

apresentados os gráficos nos períodos análogos para Portugal, devido a terem características idênticas, que podem ser observadas nos anexos 3 e 4).

Na Figura 4.12, observa-se que nos 3ºs trimestres entres os anos de 2007 e 2008, os gráficos têm forma semelhante, embora se verifiquem preços mais elevados, no ano de 2008, conforme ocorreu no 1º trimestre.

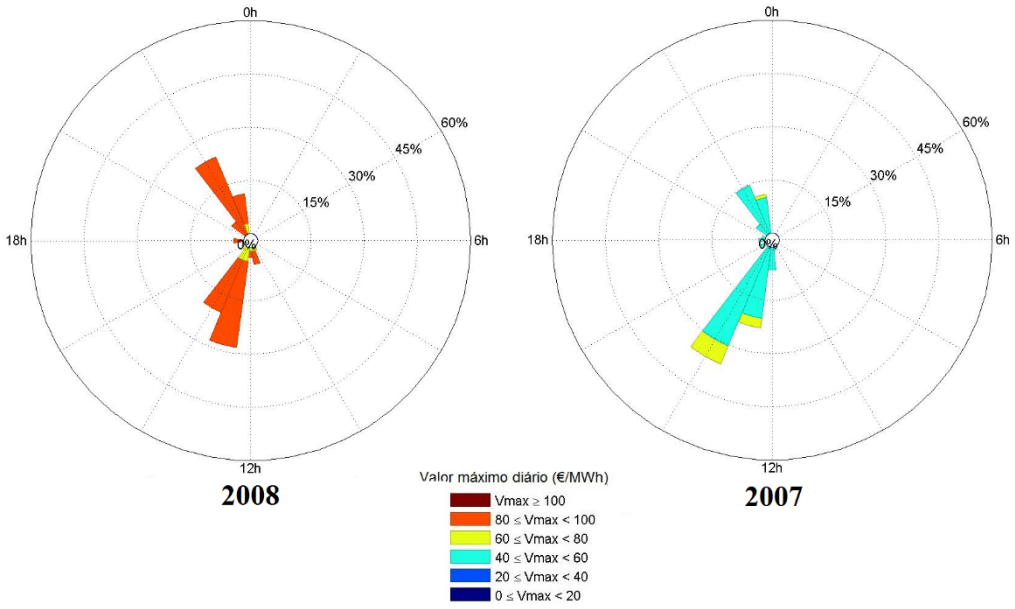


Figura 4.12 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 3º trimestre de 2007 e 2008, em Espanha

À exceção do que aconteceu no ano de 2008, que foi um ano atípico, pelas razões explicitadas na secção 4.3.1.2, de um modo geral existe a tendência para ocorrerem preços máximos diários mais baixos nos 3ºs trimestres, não se verificando ocorrência de preços máximos diários acima de 80€/MWh.

Na Figura 4.13 pode observar-se que os gráficos têm cores azuis e amarela entre 2009 e 2014. Nos anos de 2009 e 2010, a tendência de preços máximos diários mais baixos é ainda mais visível, com poucas observações acima de 60€/MWh, e em 2009 com observações inferiores a 40€/MWh.

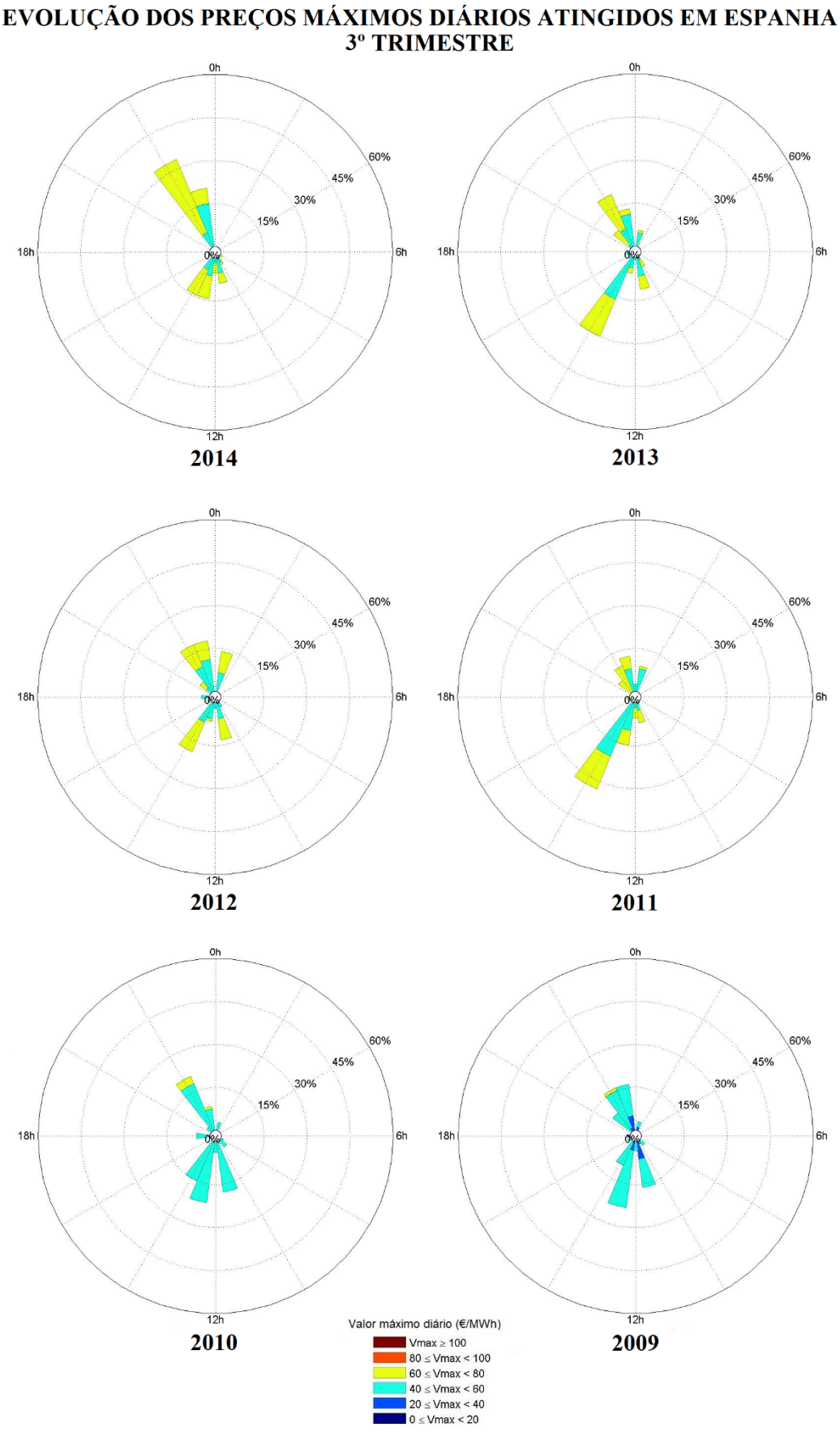


Figura 4.13 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário, no 3º trimestre entre 2009 e 2014, em Espanha

4.3.2 Análise descritiva - métodos de estatística circular

Com o objetivo de caraterizar os dados em estudo, foram executados métodos de estatística circular descritiva. Os métodos descritivos permitem sintetizar a informação e organizar os dados, permitindo investigar a existência de padrões nos elementos em estudo. Por este motivo foram aplicados métodos de estatística circular, nomeadamente: cálculo de medidas de localização: média circular, mediana circular e quartis; foi feita uma análise de dispersão através do cálculo da variância circular, variação circular-range e desvio padrão; e por fim foram feitos testes para aferir se os dados tinham uma distribuição uniforme e Von Mises.

Os métodos de estatística circular foram aplicados ao conjunto de dados relativos às horas, em que ocorreram os preços máximos diários, no 1º e 3º trimestre de cada ano, entre julho de 2007 e dezembro de 2014. Uma vez que o início de funcionamento do MIBEL se deu a 1 de julho de 2007, nas tabelas de resultados apresentadas desse ano apenas é referido o 3º trimestre.

Na secção 4.3.2, são apresentados os resultados, obtidos com recurso ao *software R (2014)* e utilização dos *packages CircStats* e *Circular*.

Foi definido que a origem é coincidente com as 6 horas, e que o sentido de rotação é anti-horário, semelhante a um círculo cartesiano, para permitir uma análise intuitiva dos resultados.

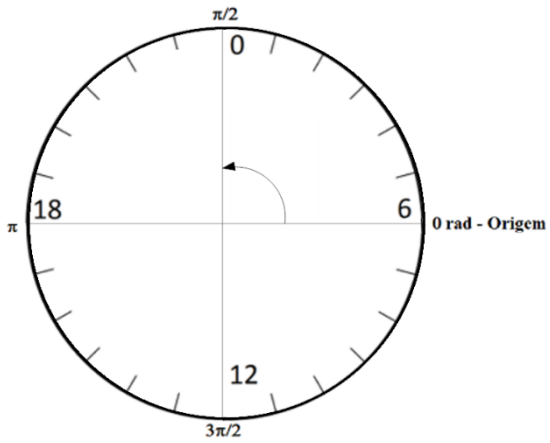


Figura 4.14 Definição de origem e sentido de rotação

Os dados foram convertidos para radianos com a seguinte fórmula:

$$H_{max.rad} == -\frac{2\pi}{24}H + \frac{5\pi}{2} \qquad (4.1)$$

$H_{max.rad}$ – é a hora em que se atinge o valor máximo diário em radianos

H – é a hora em que se atinge o valor máximo diário em horas

4.3.2.1 Média circular

A média é uma medida de localização do centro da amostra, para o seu cálculo considera-se que todas observações têm massa unitária, e pode ser utilizada como uma medida representativa do conjunto.

Na Tabela 4.4, apresentam-se os valores das médias circulares da hora em que ocorreram os preços máximos diários, no MIBEL em Portugal e Espanha entre o 1º trimestre de 2007 e o 3º trimestre de 2014. Analisando os resultados obtidos, verifica-se, que à exceção do 3º trimestre de 2007 (em que existe uma diferença de 1 hora e 3 minutos entre as médias dos dois países), nos restantes períodos as médias circulares são semelhantes, no mesmo período ao longo dos anos, com uma diferença entre os dois países inferior a 20 minutos.

ANO	1º TRIMESTRE		3º TRIMESTRE	
	PORTUGAL	ESPANHA	PORTUGAL	ESPANHA
2007	-	-	*16:19*	*15:16*
2008	*20:29*	*20:30*	*16:06*	*16:13*
2009	*21:00*	*20:51*	*16:16*	*16:00*
2010	*21:18*	*21:24*	*14:49*	*14:43*
2011	*21:20*	*21:12*	*15:44*	*15:41*
2012	*20:51*	*20:48*	*19:42*	*19:34*
2013	*21:18*	*21:14*	*17:16*	*17:10*
2014	*21:16*	*21:17*	*18:31*	*18:44*

Tabela 4.4 Média circular (horas) – hora média do preço máximo diário no 1º trimestre e 3º trimestre

Pode observar-se também que as médias circulares no 1º trimestre nos diversos anos em Portugal são entre as 20:29 e as 21:24 e em Espanha entre as 20:30 e as 21:24, enquanto no 3º trimestre se verificam mais cedo em Portugal entre 14:49 e as 19:42, e em Espanha entre as 14:43 e as 19:34.

Nos gráficos circulares dos 1ºs trimestres, pode observar-se uma concentração de ocorrências de preços máximos, no período noturno, com intervalos modais entre as 20:00 e 22:00 horas. Na Tabela 4.4 apresentam-se as médias circulares calculadas, e é possível constatar que nos 1ºs trimestres são próximas das 21:00.

Analisando as representações gráficas relativas aos 3ºs trimestres verifica-se que os intervalos modais, estão repartidos, em parte ocorrem no período noturno, tal como ocorre nos 1ºs trimestres, mas também no período da manhã e tarde. Nas médias circulares apresentadas na Tabela 4.4, pode verificar-se uma maior dispersão de resultados, sendo que a média mais frequente é aproximadamente 16:00, um valor intermédio entre os intervalos modais noturnos e do início da tarde verificados nos gráficos circulares.

Estes resultados corroboram as observações indicadas na seção 4.3.1.

4.3.2.2 Mediana circular

A mediana é uma medida descritiva que permite encontrar uma localização central da amostra. As medianas das horas em que se atinge o valor máximo diário em Portugal e em Espanha, nos 1º e 3ºs trimestres entre 2007 e 2014 são apresentadas na secção 4.3.2.3, nas Tabelas 4.5 e 4.6, uma vez que a mediana é coincidente com o 2º quartil.

4.3.2.3 Quartis

Os quartis dividem a amostra em quatro partes:

- 25% das observações têm um valor inferior (ou igual) a $Q_{0,25}$
- 50% das observações têm um valor inferior (ou igual) a $Q_{0,50}$
- 75% das observações têm um valor inferior (ou igual) a $Q_{0,75}$

Nas Tabelas 4.5 e 4.6, são apresentados os resultados relativos aos quartis dos dados das horas em que são atingidos os preços máximos diários. Pode observar-se um comportamento semelhante entre Portugal e Espanha, confirmando a real integração dos dois mercados.

Ao longo dos anos, observa-se que a mediana circular, que coincide com o 2º quartil, em Portugal e Espanha é praticamente constante. Nos sete anos em análise, em cinco a mediana em ambos os países é às 21:00, nos outros dois anos, tem valores próximos, em 2010 a diferença entre as medianas dos máximos diários nos dois países é de 30 minutos, em Portugal a mediana é 21:30 e em Espanha 22:00, e em 2012 em Portugal a mediana é 21:00 e em Espanha 20:00.

As medianas dos valores relativos aos 3ºs trimestres são iguais em ambos os países em cinco dos oito anos, sendo quatro destes às 13:59, entre os anos de 2008 e 2011 e o outro às 22:00, no ano de 2014.

Na Tabela 4.5, pode verificar-se que nos 1ºs trimestres, tanto em Portugal como em Espanha, há no máximo duas horas de diferença entres o 1º quartil e o 3º quartil, sendo que o 2º quartil que é coincidente com a mediana se verifica às 21:00 em seis das sete ocorrências.

Estes resultados indicam que nos 1ºs trimestres houve uma grande concentração nos intervalos entre as 20:00 e as 22:00, este facto está relacionado com as horas de maior procura, que se verificam a horas semelhantes, conforme se indica na secção 4.4 relativa ao estudo de dados de procura e produção de energia elétrica.

1º TRIMESTRE						
ANO	**PORTUGAL**			**ESPANHA**		
	1ºQUARTIL	**2º QUARTIL MEDIANA**	**3ºQUARTIL**	**1ºQUARTIL**	**2º QUARTIL MEDIANA**	**3ºQUARTIL**
2007	-	-	-	-	-	-
2008	*20:00*	*21:00*	*21:00*	*20:00*	*21:00*	*21:00*
2009	*21:00*	*21:00*	*21:00*	*20:00*	*21:00*	*21:00*
2010	*21:00*	*21:30*	*22:00*	*21:00*	*22:00*	*22:00*
2011	*20:00*	*21:00*	*22:00*	*20:00*	*21:00*	*22:00*
2012	*20:00*	*21:00*	*22:00*	*20:00*	*20:00*	*22:00*
2013	*20:00*	*21:00*	*22:00*	*20:00*	*21:00*	*22:00*
2014	*20:00*	*21:00*	*22:00*	*20:00*	*21:00*	*22:00*

Tabela 4.5 Quartis da hora em que se atingem os preços máximos no mercado diário, no 1º trimestre

Na Tabela 4.6, com os resultados relativos aos 3ºs trimestres, observa-se que ao contrário do que acontece nos 1ºs trimestres, existe uma diferença significativa entre o 1ºquartil e o 3ºquartil, nos dezasseis períodos estudos superior a 7:00. Este facto indica uma dispersão de intervalos modais, confirmando os resultados obtidos nas inspeções dos gráficos circulares da secção 4.3.

O valor do 2º quartil, coincidente com a mediana é tendencialmente às 13:59, mais próximo do 1º quartil do que do 3º quartil, indicando uma concentração de observações nesse período. Este acontecimento está relacionado com as horas de procura de energia elétrica, como se pode observar por inspeção visual nos gráficos circulares nos anexos 3, 4, 7 e 8.

3º TRIMESTRE						
ANO	**PORTUGAL**			**ESPANHA**		
	1ºQUARTIL	**2º QUARTIL MEDIANA**	**3ºQUARTIL**	**1ºQUARTIL**	**2º QUARTIL MEDIANA**	**3ºQUARTIL**
2007	*13:59*	*16:00*	*21:00*	*12:59*	*13:59*	*22:00*
2008	*12:59*	*13:59*	*22:00*	*12:59*	*13:59*	*22:00*
2009	*12:59*	*13:59*	*22:00*	*12:59*	*13:59*	*22:00*
2010	*12:59*	*13:59*	*22:00*	*12:30*	*13:59*	*22:00*
2011	*12:59*	*13:59*	*22:00*	*12:59*	*13:59*	*22:00*
2012	*13:59*	*22:00*	*22:59*	*13:59*	*21:00*	*22:59*
2013	*13:59*	*16:00*	*22:00*	*13:59*	*13:59*	*22:00*
2014	*12:59*	*22:00*	*22:00*	*12:59*	*22:00*	*22:00*

Tabela 4.6 Quartis da hora em que se atingem os preços máximos no mercado diário, no 3º trimestre

4.3.2.4 Intervalo de variação circular - *range*

Na Tabela 4.7, indicam-se os valores do intervalo de variação circular – range. Ao longo do período estudado, observa-se que não há uma grande variação deste resultado entre 1ºs trimestres e 3ºs trimestres e entre Portugal e Espanha.

Os resultados indicam que os preços máximos atingidos foram nos períodos analisados distribuídos por 12 ou mais horas.

ANO	1º TRIMESTRE		3º TRIMESTRE	
	PORTUGAL	ESPANHA	PORTUGAL	ESPANHA
2007	-	-	*18*	*18*
2008	*14*	*14*	*17*	*17*
2009	*13*	*14*	*14*	*14*
2010	*15*	*14*	*13*	*13*
2011	*14*	*13*	*16*	*16*
2012	*13*	*13*	*15*	*15*
2013	*12*	*15*	*15*	*15*
2014	*13*	*13*	*15*	*15*

Tabela 4.7 Intervalo de variação circular (horas) - preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre

4.3.2.5 Variância Circular

A Variância é uma medida da variabilidade dos valores das observações relativamente ao vetor de comprimento médio.

Na Tabela 4.8, verifica-se que ao longo dos trimestres dos anos em estudo, a variância da frequência da hora em que se atinge o valor máximo diário é semelhante entre os dois países.

Ao comparar-se em cada um dos países, a direção da variância entre 1º e 3º trimestre do mesmo ano, observa-se que a variância no 1º trimestre tem um valor mais baixo do que no 3º trimestre, estes resultados confirmam a maior concentração dos intervalos modais nos 1ºs trimestres, que se observa nos gráficos circulares.

ANO	1º TRIMESTRE		3º TRIMESTRE	
	PORTUGAL	ESPANHA	PORTUGAL	ESPANHA
2007	-	-	*0,437*	*0,462*
2008	*0,383*	*0,357*	*0,547*	*0,585*
2009	*0,124*	*0,145*	*0,676*	*0,729*
2010	*0,120*	*0,106*	*0,554*	*0,642*
2011	*0,181*	*0,244*	*0,608*	*0,650*
2012	*0,285*	*0,336*	*0,722*	*0,744*
2013	*0,221*	*0,187*	*0,657*	*0,681*
2014	*0,287*	*0,306*	*0,717*	*0,712*

Tabela 4.8 Variância Circular (rad) - hora do preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre

4.3.2.6 Desvio padrão circular

Nos resultados do desvio padrão da hora em que foi atingido o preço máximo diário demonstrados na Tabela 4.9, observa-se ao comparar os valores do desvio padrão entre trimestres, que nos meses de inverno os valores são mais baixos do que nos meses de verão.

ANO	1º TRIMESTRE		3º TRIMESTRE	
	PORTUGAL	ESPANHA	PORTUGAL	ESPANHA
2007	-	-	*1,071*	*1,114*
2008	*0,983*	*0,940*	*1,258*	*1,326*
2009	*0,514*	*0,561*	*1,502*	*1,615*
2010	*0,506*	*0,474*	*1,270*	*1,434*
2011	*0,633*	*0,747*	*1,369*	*1,448*
2012	*0,819*	*0,905*	*1,601*	*1,650*
2013	*0,708*	*0,643*	*1,464*	*1,511*
2014	*0,823*	*0,854*	*1,589*	*1,578*

Tabela 4.9 Desvio padrão circular (rad) - preço máximo diário, no 1º trimestre e 3º trimestre

4.3.3 Testes de uniformidade e Von Mises

Com o objetivo de validar ou não as hipóteses, por forma a aferir se os dados têm uma distribuição uniforme ou têm uma distribuição Von Mises, foram realizados testes de Watson, aos dados das horas dos preços máximos diários, verificados em dois períodos, 1º e 3º trimestre, em Portugal e em Espanha.

4.3.3.1 Teste de Watson – verificação se distribuição é uniforme

No ambiente *R*, foram executados testes de Watson, para verificar se a hora dos preços máximos diários nos trimestres em estudo, têm uma distribuição uniforme. Nos trinta testes realizados, para cada um dos trimestres em Portugal e Espanha entre 2007 e 2014, o *p-value* resultante é inferior a 0,01 (os valores do *p-value*, não são indicados neste trabalho, devido ao resultado do teste realizado no ambiente *R*, apenas indicar que é inferior a 0,01 sem especificar o valor do mesmo).

Podemos assim concluir pela rejeição da hipótese nula de os dados terem distribuição uniforme, de acordo com a seção 3.3.1.1.Analisando os resultados obtidos através do teste de uniformidade de Watson, verifica-se que o conjunto de dados analisado não é uniforme, ao nível de significância de 1%.

4.3.3.2 Teste de Watson – verificação se distribuição é Von Mises

Com o objetivo de verificar se a hora em que se atingem os preços máximos diários nos trimestres em estudo, têm uma distribuição Von Mises, foram realizados testes de Watson, em ambiente *R*, para cada um dos trimestres em Portugal e Espanha entre 2007 e 2014. Nos trinta testes realizados, o *p-value* resultante é inferior a 0,01 (os valores do *p-value*, não são indicados neste trabalho, devido ao resultado do teste realizado no ambiente *R*, apenas indicar que é inferior a 0,01 sem especificar o valor do mesmo).

Podemos assim concluir pela rejeição da hipótese nula que os dados terem uma distribuição Von Mises, de acordo com a seção 3.3.1.2. Analisando os resultados obtidos através do teste de Watson, verifica-se que o conjunto de dados analisados da amostra provém de uma população com distribuição não Von Mises, ao nível de significância de 1%.

4.4 Estudo de dados de procura e produção de energia elétrica

Na segunda fase do trabalho, com o objetivo de comprender as causas do comportamento dos preços máximos diários, nomeadamente: as horas em que ocorrem e valores que foram atingidos, foi feito um estudo dos dados de procura e produção de energia por tecnologia, nos mesmos periodos da primeira fase do estudo, 1º e 3º trimestre, em Portugal e em Espanha.

Tratando-se de um mercado oligopolista, em que existe um número limitado de empresas produtoras com grande preponderência, existe a hipótese de cada uma das empresas ter capacidade de influenciar os preços praticados no mercado. Neste sentido a estratégia das empresas produtoras também pode conduzir a alterações no comportamento do mercado, no entanto não se inclui a sua análise neste trabalho.

O estudo da forma como os preços máximos da energia transacionada no MIBEL e a hora em que são atingidos, se relaciona com a procura de energia e com o tipo de tecnologia de produção de energia, foi efetuado com recurso à inspeção visual de gráficos circulares e de uma análise de concordância.

4.4.1 Origem dos dados – procura e produção de energia elétrica

Os dados utilizados na segunda fase do estudo, foram as quantidades horárias de procura de energia elétrica verificada no MIBEL (MIBEL, 2016), e as quantidades horárias de energia elétrica produzida em Portugal e Espanha (MIBEL, 2016), nos 1ºs e 3ºs trimestres de 1 de julho de 2007 a 30 de setembro de 2014.

Os dados de procura de energia elétrica foram agrupados por: ano, trimestre, e o país a que correspondem; do mesmo modo que foram classificados os dados correspondentes aos preços máximos diários na primeira fase do estudo, por forma a possibilitar um cruzamento de resultados obtidos, entre as duas fases do trabalho e tirar conclusões.

A amostra de dados de produção de energia elétrica (MIBEL, 2016), utilizada para o estudo, inclui as tecnologias de produção através das seguintes fontes: carvão, gás natural em ciclo combinado, hídrica e PRE. Não foram utilizados dados relativos às horas em que ocorre a máxima produção nuclear, devido aos valores de produção de energia elétrica por esta fonte serem constantes ao longo do dia, devido à especificidade desta tecnologia, que não permite entrada e saída de funcionamento em curtos espaços de tempo.

As quantidades de energia produzida estão discriminadas por tecnologia e por país, sendo que para a energia produzida através de PRE, apenas foram utilizados quantidades de produção em Espanha.

Uma vez que o mercado português e o mercado espanhol estão integrados, as quantidades de produção de energia elétrica utilizados na secção 4.4, referem-se à soma da energia elétrica produzida nos dois países em cada uma das tecnologias, exceto quando ocorre *market splitting* em que os dados são referentes a cada país individualmente.

A informação foi classificada de modo semelhante ao da procura, tendo em conta a tecnologia de produção, ano, trimestre, e país em que a energia foi produzida. Foi aplicada uma metodologia, para tratamento dos dados utlizados, semelhante ao executado em 4.2, na primeira parte do trabalho, com o objetivo de identificar os valores e a hora em que ocorrem os máximos diários de procura e de produção de energia elétrica através de cada uma das tecnologias, carvão, gás natural, hídrica e PRE.

No estudo, em cada uma das tecnologias, foram excluídos os dias em que não houve produção, caso contrário, uma vez que se consideram todas as horas em que se atingiu o valor máximo diário, seriam considerados vinte e quatro máximos com valor zero, em cada um desses dias, induzindo em erro os resultados e posteriormente a respetiva análise.

Após este procedimento foram criados gráficos circulares, e aplicado um método para aferir a concordância entre resultados.

4.4.2 Análise de gráficos circulares – procura e produção

Na Figura 4.15 estão representadas as quantidades de energia transacionada mensalmente no MIBEL, por cada uma das tecnologias de produção, de janeiro de 2008 a julho de 2014. Neste gráfico é possível observar os meses em que a produção hídrica foi mais elevada os meses em que foi menos elevada, assim como os meses em que a PRE teve uma posição dominante.

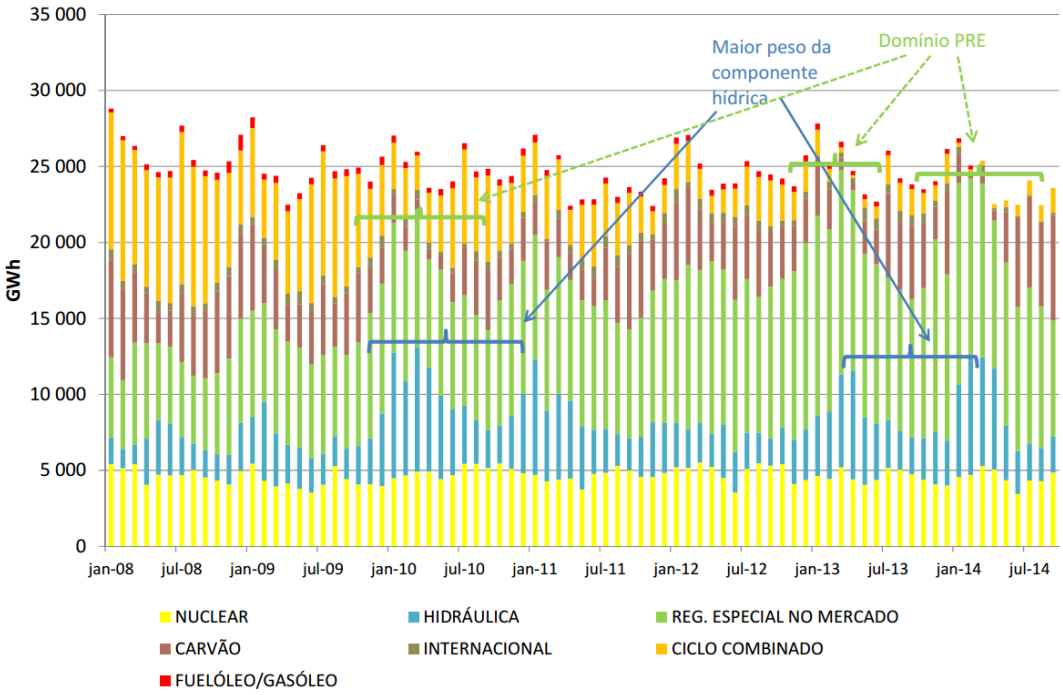


Figura 4.15 Energia transacionada no MIBEL por tecnologia (ERSE, 2014)

Com o objetivo de procurar padrões de comportamento, nos valores e nas horas em que se atingem as quantidades máximas diárias de procura e de produção por cada uma das fontes de energia elétrica, foram criados gráficos circulares.

Na Figura 4.16, é possível comparar a frequência da hora do preço máximo diário em Espanha e frequência da hora da produção hídrica máxima diária em Espanha, no 1º trimestre de 2008, que conforme se pode observar na Figura 4.15, é o trimestre com menor quantidade de energia transacionada com origem em geração hídrica. De acordo com o analisado na secção 4.3.1.3 do presente trabalho, este foi o período em que os preços máximos atingiram valores mais elevados, no perdido analisado no presente trabalho, atingindo valores superiores a 80€/MWh, na maior parte das ocorrências.

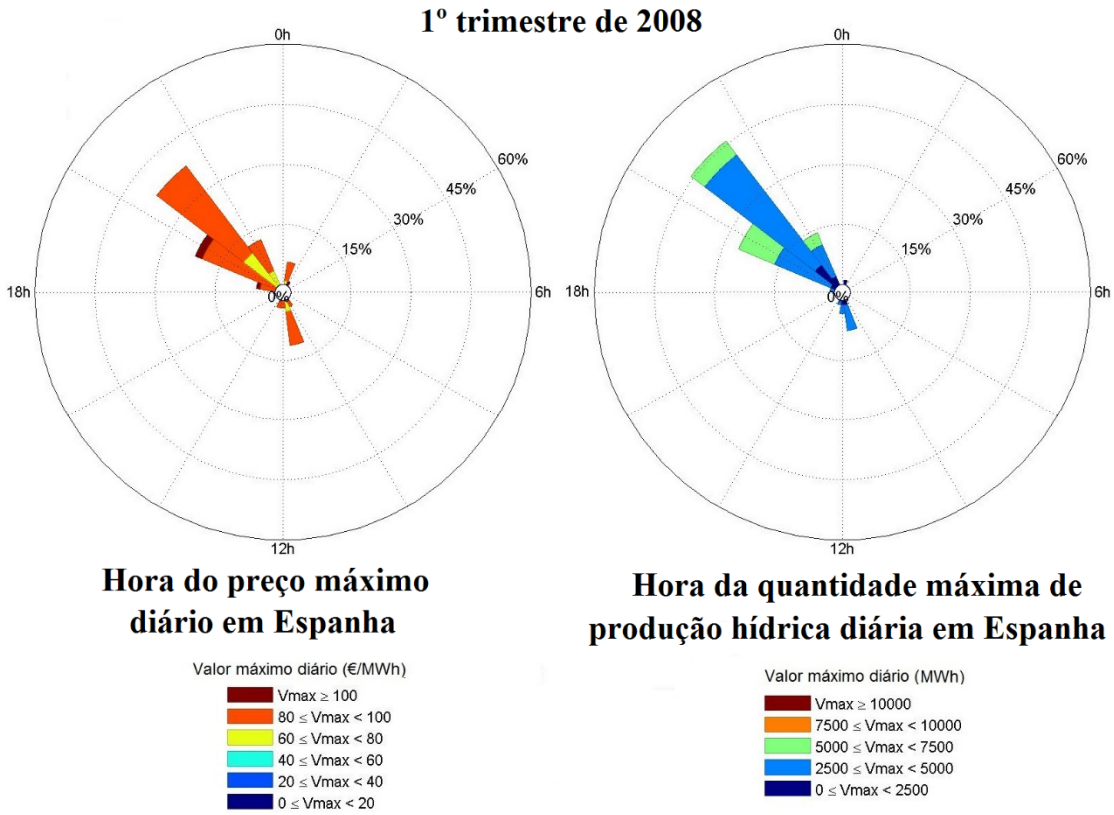


Figura 4.16 Gráfico circular da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário e gráfico circular da frequência da hora em que é atingida a produção máxima hídrica diária, no 1º trimestre de 2008, em Espanha

Comparando os dois gráficos da Figura 4.16, observa-se em ambos que as horas mais frequentes são coincidentes. Embora os dois gráficos não tenham forma exatamente igual, é possível identificar que nos preços máximos diários e na máxima produção hídrica diária, o maior intervalo modal ocorre às 21:00, a segunda hora mais frequente é a 20:00, a terceira a 22:00 e a quarta às 11:00.

Na Figura 4.17, representa-se graficamente a frequência da hora em que são atingidos os preços máximos diários em Espanha no 1º trimestre de 2014, que corresponde ao trimestre dos meses de inverno, e a frequência da hora em que são atingidas as quantidades máximas de energia produzida através com recurso a tecnologia hídrica, no 1º trimestre de 2014 em Espanha. Este foi um dos trimestres com maior componente hídrica no total da energia elétrica produzida entre o ano de 2007 e 2014.

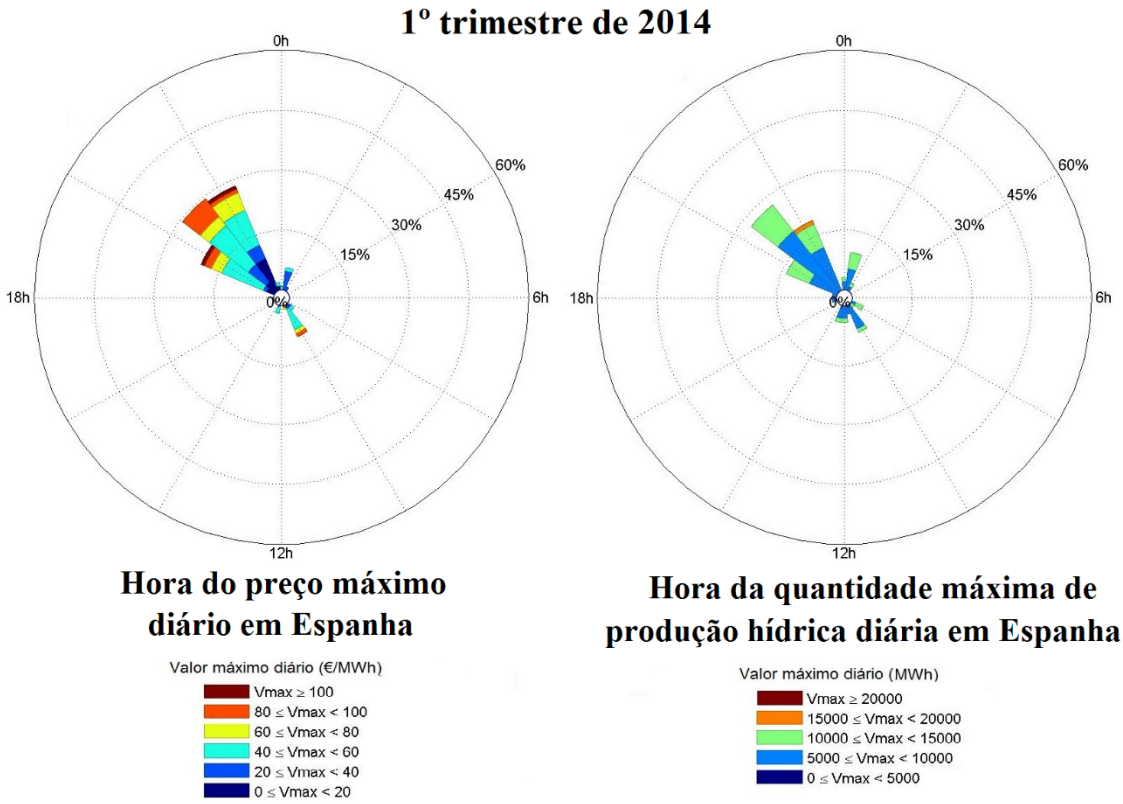


Figura 4.17 Gráfico circular da frequência da hora em que é atingido o preço máximo diário e gráfico circular da frequência da hora em que é atingida a produção máxima hídrica diária, no 1º trimestre de 2014, em Espanha

Comparando os dois gráficos pode observar-se, que têm uma forma semelhante. Embora existam algumas diferenças, os intervalos modais são os mesmos em ambos os gráficos, nomeadamente a hora mais frequente ocorre às 21:00, a segunda mais frequente às 22:00 e a terceira às 20:00. Existem ainda outros intervalos modais de maior frequência, que se destacam embora de menor dimensão: à 01:00, e às 10:00. Restantes máximos diários estão distribuídos por outras horas, de forma menos concentrada.

Através de uma análise visual, é possível aferir que existe uma relação entre a hora em que se atinge o preço máximo diário e a hora em que se verifica a quantidade máxima diária de produção de energia elétrica, com recurso a tecnologia de produção hídrica. É possível observar nos anexos 5, 6, 7 e 8, que o mesmo comportamento ocorre repetidamente, nos 1ºs e nos 3ºs trimestres nos diversos dos anos em estudo, tanto nos anos em que existe uma quantidade de produção hídrica elevada, como nos anos em que a quantidade de produção através desta tecnologia é mais baixa. É possível verificar nos anexos 1, 2, 3 e 4, que o mesmo comportamento se verifica nos dados de Portugal.

Ao contrário do que acontece com outras fontes de produção, a geração através de tecnologia hídrica permite o armazenamento do recurso, com a retenção de água em barragens de modo a permitir definir a entrada em funcionamento de forma mais controlada do que acontece com outras tecnologias, como o caso da eólica, cuja geração que está dependente da existência de vento.

Por outro lado é possível proceder à entrada e saída de funcionamento de forma expedita, ao contrário do que acontece com outras tecnologias, nomeadamente as centrais térmicas em que é necessário mais tempo entrar e sair de funcionamento.

Assim, pode constatar-se que as horas em se atingem os preços máximos, é coincidente com as horas em que ocorre a máxima produção hídrica diária, uma vez que os agentes das tecnologias hídricas, aproveitam as horas de preços mais elevados para turbinar água para produzir energia elétrica, de modo a maximizar o lucro.

Na Figura 4.18, são apresentados gráficos circulares com a frequência da hora em que ocorrem as produções máximas diárias de energia elétrica, com recurso às tecnologias de geração com recurso a carvão, gás e PRE e da procura máxima, no 1º trimestre de 2014 em Espanha. É possível verificar que a forma dos gráficos relativos às tecnologias de produção com recurso a Carvão, Gás e PRE são distintos dos gráficos representativos dos preços máximos diários.

Assim, constata-se que não é evidente que a hora em que ocorre o preço máximo, seja coincidente com a hora em que a produção destas tecnologias é máxima. Os gráficos de máxima produção apresentados na Figura 4.18, apresentam forma diferente do gráfico da máxima procura, este facto sugere que estas fontes não adaptam a sua produção, por forma haver produção máxima diária, nas horas em que se atingem os preços máximos diários.

Nos anexos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, pode verificar-se o mesmo tipo de ocorrência para os restantes trimestres em Portugal e em Espanha.

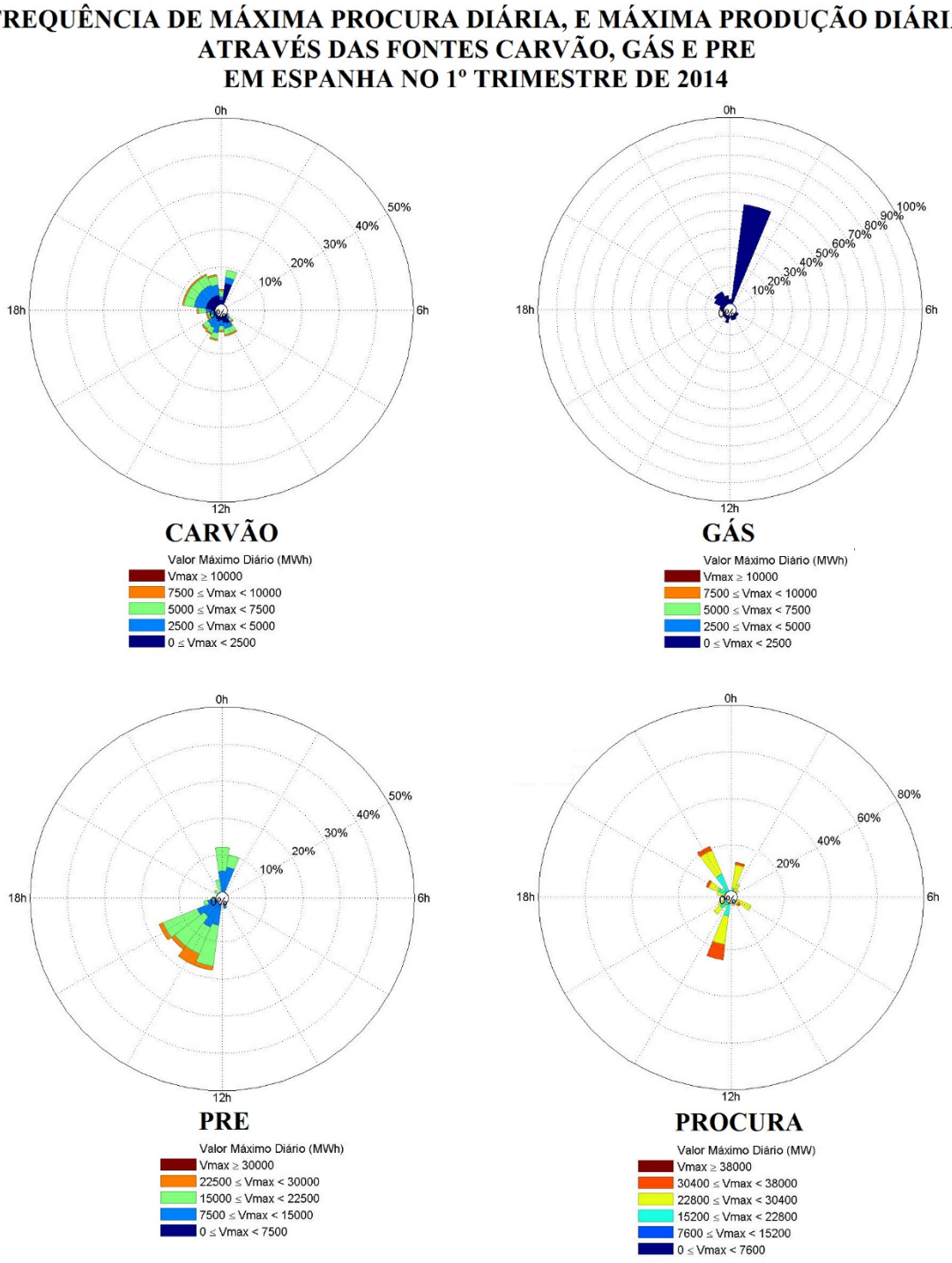


Figura 4.18 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingida a procura e produção máxima nas tecnologias Carvão, Gás, PRE, no 1º trimestre de 2014, em Espanha

Na Figura 4.19, apresentam-se os gráficos circulares da frequência em que ocorre a produção máxima diária nas centrais com recurso a carvão no 3º trimestre de 2014 em Portugal e em Espanha.

Comparando os dois gráficos, verifica-se que em Portugal os máximos ocorrem com uma maior distribuição pelas diversas horas, apresentando uma forma mais uniforme

do que se verifica em Espanha. Estes resultados são repetidos nos diversos períodos, conforme se verifica nos anexos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. É possível que esta tendência esteja relacionada com o facto de este tipo de tecnologia cumprir em Portugal o papel de tecnologia de base, que no caso de Espanha é desempenhado pelas centrais nucleares.

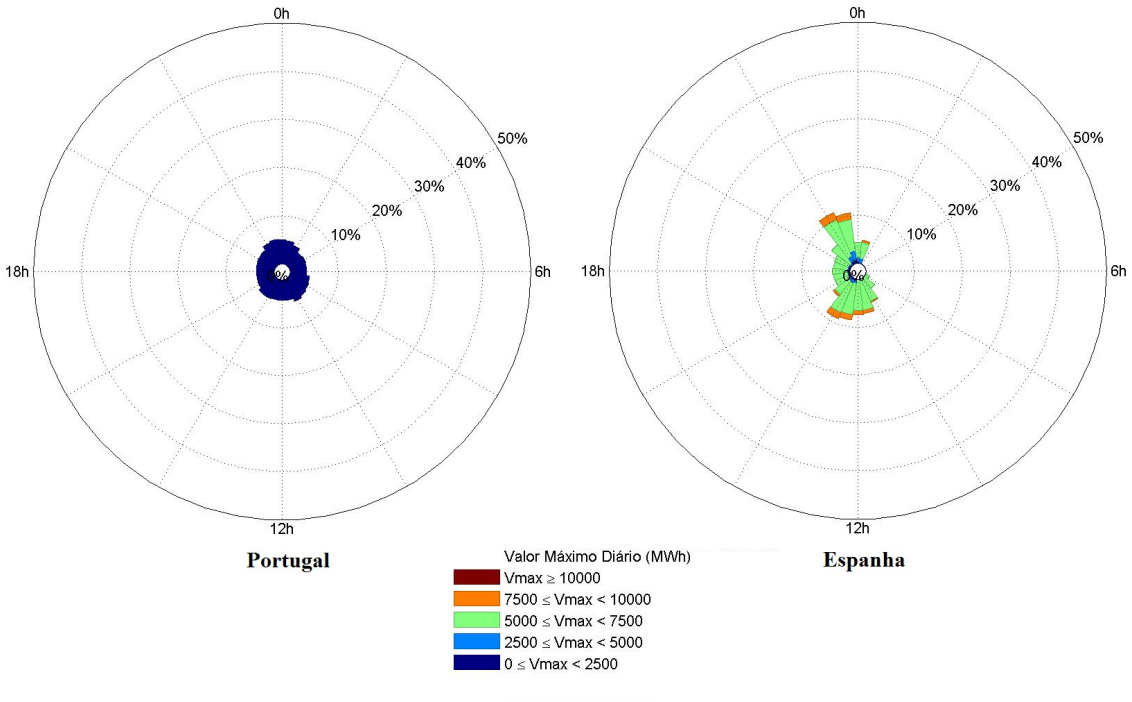


Figura 4.19 Gráficos circulares da frequência da hora em que é atingida a produção máxima nas centrais a carvão, no 3º trimestre de 2014 em Portugal e em Espanha

Nos gráficos circulares nos anexos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, relativos à frequência da hora em que se atinge os valores máximos de procura em Portugal e em Espanha é possível observar que tal como acontece na frequência da hora em que se atinge os preços máximos, nos 1ºs trimestres tendencialmente existe uma concentração de observações em horas noturnas às 21:00 e 22:00, e nos 3ºs trimestres verificam-se um grande número de observações no período da tarde às 14:00, em Espanha e às 13:00 e entre 2012 e 2014 às 17:00 em Portugal. Assim é verificar que existe uma relação entre a hora em que se atinge o preço máximo diário e a hora em que se atinge a procura máxima diária.

4.4.3 Análise de concordância

Com a análise visual dos gráficos circulares com o objetivo de quantificar a relação que entre os diversos elementos em estudo. A constatação de que o número de observações não é coincidente para variáveis distintas, impediu a utilização de outros indicadores, nomeadamente coeficiente de correlação circular ou índice de concordância *kappa*.

Em alternativa calculou-se a percentagem de concordância com recurso ao *software Microsoft Office – Excel* (2013). A finalidade deste método foi identificar em que percentagem os preços máximos diários em Portugal e em Espanha, ocorriam à mesma hora que os valores máximos diários da procura de energia elétrica no MIBEL e da produção de energia por tecnologia de geração.

No método aplicado, em cada um dos dias do período estudado (1º e 3º trimestres de cada ano), verifica-se se a hora em que o preço máximo é atingido em Portugal, ocorre à mesma hora em que a quantidade máxima do conjunto de dados com que se compara, caso se confirme é contabilizada uma concordância, caso contrário é contabilizada uma discordância. A percentagem de concordâncias é dada do seguinte modo:

(4.1)

$$percentagem\ de\ concordância = \frac{\text{nº de concordâncias}}{\text{nº concordâncias} + \text{nº discordâncias}} \times 100$$

Em seguida apresenta-se um exemplo, do método utilizado para calcular o índice de concordância entre a hora em que foi atingido o preço máximo diário em Portugal, e a hora em que foi atingida a quantidade máxima diária de produção de determinada tecnologia em Portugal.

Neste exemplo, o método é efetuado apenas em dois dias para um tipo de fonte de produção. Esta metodologia foi repetida para cada um dos dias dos 1ºs e 3ºs trimestres, de cada ano, para Portugal e Espanha, com dados da procura e com os dados de cada uma das tecnologias em estudo.

Em primeiro lugar identifica-se a hora em que os preços máximos diários foram atingidos.

DIA	HORA A QUE OCORRE O PREÇO MAXIMO EM PORTUGAL																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
01-07-2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
30-09-2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.20 Hora em que o preço máximo diário foi atingido

No segundo passo é identificada a hora em que foi atingida a quantidade máxima diária de produção de determinada tecnologia em Portugal

DIA	HORA A QUE OCORRE O MAXIMA PRODUÇÃO EM PORTUGAL																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
01-07-2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
30-09-2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.21 Hora em que foi atingida a quantidade máxima diária de produção de determinada tecnologia

Para cada um dos dias identificam-se os casos, em que os máximos das duas variáveis em estudo, ocorrem à mesma hora.

DIA	CONCORDANCIAS																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
01-07-2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
30-09-2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.22 Concordância entre hora em que o preço máximo diário foi atingido e hora em que foi atingida a quantidade máxima diária de produção de determinada tecnologia

Neste caso, o preço máximo em Portugal ocorre em simultâneo com a máxima produção em Portugal às 14:00 do dia 30-09-2014, o que constitui uma concordância. No dia 01-07-2014, não ocorreram quaisquer concordâncias, uma vez que os preços máximos ocorrem às 11:00 e 22:00 e a produção máxima ocorreu às 12:00.

- Número de concordâncias = 1
- Número de discordâncias = 2

A percentagem de concordância é dada pela percentagem de concordâncias, ou seja para este exemplo:

$$percentagem\ de\ concordância = \frac{1}{1+2} \times\ 100 = 33\%$$

Na tabela 4.10, pode verificar-se elevados índices de concordância a hora a que se atingem os preços máximos diários em Portugal e em Espanha. Estes resultados confirmam os resultados das inspeções visuais dos gráficos circulares.

CONCORDÂNCIA DE PREÇOS ENTRE PORTUGAL/ESPANHA		
ANO	**1º TRIMESTRE**	**3º TRIMESTRE**
2007	-	*49%*
2008	*69%*	*85%*
2009	*81%*	*88%*
2010	*89%*	*69%*
2011	*89%*	*91%*
2012	*84%*	*96%*
2013	*71%*	*95%*
2014	*85%*	*99%*

Tabela 4.10 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Portugal e em Espanha no mercado diário

A análise de concordância foi efetuada entre a hora do preço máximo atingido em Portugal e a hora das quantidades máximas diárias de produção de energia elétrica com as fontes de geração carvão, gás natural e hídrica.

Através da análise da Tabela 4.11, pode concluir-se que a produção máxima através de centrais hídricas é frequentemente coincidente com os preços máximos diários.

Estes resultados são coincidentes com os obtidos através da análise visual, e podem ser justificados de acordo com o indicado na secção 4.2.

CONCORDÂNCIA DE PREÇOS/PRODUÇÃO EM PORTUGAL						
ANO	**1º TRIMESTRE**			**3º TRIMESTRE**		
	MAXIMA PRODUÇÃO CARVÃO	**MAXIMA PRODUÇÃO GAS**	**MAXIMA PRODUÇÃO HIDRICA**	**MAXIMA PRODUÇÃO CARVÃO**	**MAXIMA PRODUÇÃO GAS**	**MAXIMA PRODUÇÃO HIDRICA**
2007	-	-	-	*0%*	*22%*	*40%*
2008	*2%*	*14%*	*44%*	*1%*	*14%*	*61%*
2009	*0%*	*13%*	*59%*	*3%*	*24%*	*55%*
2010	*0%*	*16%*	*54%*	*0%*	*14%*	*54%*
2011	*4%*	*32%*	*51%*	*6%*	*34%*	*54%*
2012	*3%*	*43%*	*63%*	*2%*	*23%*	*61%*
2013	*2%*	*34%*	*51%*	*4%*	*11%*	*67%*
2014	*5%*	*15%*	*55%*	*3%*	*13%*	*71%*

Tabela 4.11 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Portugal no mercado diário e hora de máxima produção em cada tecnologia

Na Tabela 4.12, pode verificar-se que existe alguma concordância entre a hora em que se atingem os preços máximos diários e a procura em Portugal. O facto de esta concordância não ser superior, está relacionado com o facto de o mercado estar integrado com Espanha, e os valores máximos de procura em Espanha, ocorrem frequentemente em horas diferentes daquelas em que ocorrem os valores máximos de procura em Portugal.

CONCORDÂNCIA DE PREÇOS/PROCURA EM PORTUGAL		
ANO	**1º TRIMESTRE**	**3º TRIMESTRE**
2007	*43%*	*26%*
2008	*63%*	*35%*
2009	*30%*	*26%*
2010	*31%*	*40%*
2011	*32%*	*28%*
2012	*27%*	*23%*
2013	*40%*	*21%*
2014	*43%*	*17%*

Tabela 4.12 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Portugal no mercado diário e hora de máxima procura de energia elétrica

Na Tabela 4.13 pode observa-se que de todas as tecnologias, a hora de máxima produção através da fonte hídrica é a que apresenta maior concordância com o preço máximo diário em Espanha.

Apesar de existir uma grande quantidade de energia produzida através de PRE, a percentagem de concordância da hora de produção máxima diária, com a hora do preço máximo diário é muito baixa. Esta ocorrência deve-se fundamentalmente ao facto de em grande parte da produção PRE ser proveniente de tecnologias em que não é possível armazenar o recurso de produção, por forma a poder decidir fazer o despacho nas horas em que os preços são mais elevados, ao contrário do que acontece nas centrais hídricas em que a água é armazenada em barragens, permitindo um maior controlo na escolha das horas em que é mais favorável produzir energia elétrica a preços de mercado mais elevados.

CONCORDÂNCIA DE PREÇOS/PRODUÇÃO EM ESPANHA								
ANO	1º TRIMESTRE				3º TRIMESTRE			
	MAXIMA PRODUÇÃO CARVÃO	MAXIMA PRODUÇÃO GAS	MAXIMA PRODUÇÃO HIDRICA	MAXIMA PRODUÇÃO PRE	MAXIMA PRODUÇÃO CARVÃO	MAXIMA PRODUÇÃO GAS	MAXIMA PRODUÇÃO HIDRICA	MAXIMA PRODUÇÃO PRE
2007	-	-	-	-	*11%*	*40%*	*64%*	*6%*
2008	*32%*	*25%*	*66%*	*6%*	*10%*	*17%*	*61%*	*8%*
2009	*7%*	*31%*	*59%*	*2%*	*28%*	*25%*	*60%*	*5%*
2010	*33%*	*47%*	*54%*	*3%*	*16%*	*23%*	*65%*	*3%*
2011	*27%*	*34%*	*50%*	*0%*	*40%*	*39%*	*59%*	*2%*
2012	*27%*	*19%*	*68%*	*1%*	*24%*	*23%*	*65%*	*0%*
2013	*12%*	*10%*	*49%*	*0%*	*21%*	*12%*	*69%*	*3%*
2014	*21%*	*13%*	*45%*	*1%*	*19%*	*13%*	*66%*	*1%*

Tabela 4.13 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Espanha no mercado diário e hora de máxima produção em cada tecnologia

A maior concordância dos preços máximos diários com a máxima produção diária com recurso a centrais térmicas a carvão em Espanha do que em Portugal, indicia que este tipo de tecnologia em Portugal serve de tecnologia de base, ao passo que em Espanha esse papel é desempenhado por tecnologia nuclear. Este facto também pode ser observado nos gráficos circulares onde o valor do máximo é mais constante no dados de Portugal do que nos dados de Espanha.

Na tabela 4.14 pode verificar-se que as horas em que se atinge o preço máximo diário em Espanha, estão relacionadas com as horas de maior procura em Espanha. A percentagem de concordância não é no entanto superior, devido aos preços máximos em Espanha serem influenciados também pela procura de energia elétrica que se verifica em Portugal, que muitas vezes não é temporalmente coincidente nos dois países.

CONCORDÂNCIA DE PREÇOS/PROCURA EM ESPANHA		
ANO	**1º TRIMESTRE**	**3º TRIMESTRE**
2007	-	*28%*
2008	*55%*	*41%*
2009	*64%*	*33%*
2010	*45%*	*39%*
2011	*36%*	*46%*
2012	*40%*	*32%*
2013	*14%*	*38%*
2014	*11%*	*26%*

Tabela 4.14 Percentagem de concordância entre a hora em que se atinge o preço máximo em Espanha no mercado diário e hora de máxima procura de energia elétrica

Capítulo 5 – Conclusões e trabalho futuro

Neste capítulo são apresentadas as conclusões alcançadas nesta dissertação. São sugeridas algumas premissas para desenvolvimento do tema em estudo em trabalhos futuros.

5 - Conclusões e trabalho futuro

No presente trabalho, foram estudados comportamentos do mercado ibérico de eletricidade, utilizando métodos de estatística circular.

Um dos motivos para escolha da utilização de métodos de estatística circular neste estudo, foi devido aos gráficos circulares permitirem fazer análises intuitivas e expeditas de acontecimentos cíclicos, possibilitando a comparação de diversas amostras. Estas características possibilitaram identificar padrões de comportamento que se repetiram em ciclos trimestrais, durante o período estudado.

Inicialmente foram analisados os preços máximos diários atingidos no MIBEL entre 1 de julho de 2007 e 31 de dezembro de 2014, em Portugal e em Espanha.

Os dados foram agrupados em ciclos trimestrais, e posteriormente analisados os 1ºs trimestres e 3ºs trimestres, entre o ano 2007 e 2014. Esta associação teve como objetivo possibilitar a comparação de períodos do ano, em que ocorrem na Península Ibérica alterações meteorológicas e comportamentos sociais de forma cíclica, que influenciam o consumo e produção de energia elétrica.

Através de inspeções visuais de gráficos circulares, onde se representam a frequência e valor dos preços máximos diários atingidos no MIBEL, em Portugal e em Espanha, observa-se que os gráficos dos dois países apresentam formatos semelhantes em períodos análogos. Esta situação é confirmada pelas elevadas percentagens de concordância entre as horas em que ocorrem os preços máximos diários em Portugal e em Espanha, e indica que os preços máximos diários e a hora em que ocorrem são semelhantes em ambos os países, o que permite concluir a existência da integração dos dois mercados e confirma o funcionamento do MIBEL como mercado único.

Nas inspeções visuais efetuadas aos gráficos circulares da frequência em que se atingem os preços máximos, verificou-se que no 1º trimestre os intervalos modais mais relevantes ocorrem consequentemente nos diversos anos às 20:00, 21:00 e 22:00, ou seja de forma concentrada num período restrito de três horas. Já no 3º trimestre os intervalos modais mais preponderantes são por norma repartidos, por dois períodos, nomeadamente no período noturno à semelhança do que se verifica no 1º trimestre, e no período da manhã ou da tarde.

Estes resultados coincidem com os resultados obtidos através da aplicação de métodos de estatística circular descritiva de dispersão, nomeadamente de variância circular e desvio padrão circular. Ou seja na comparação entre trimestres em cada um dos anos em estudo, a variância e o desvio padrão adquirem valores mais elevados 3º trimestre do que no 1º trimestre.

Os resultados das medidas de centro efetuadas, nomeadamente a média e mediana circulares, também corroboram as análises visuais efetuadas. A média e a mediana circulares no 1º trimestre apresentam repetidamente, nos anos estudados, valores próximos das 21:00, enquanto no 3º trimestre os resultados da média e mediana circulares são valores maioritariamente do período da tarde, estes resultados são mais dispersos, conforme esperado pela observação da repartição dos intervalos modais neste período, na análise visual dos gráficos circulares.

Através da análise dos gráficos circulares da hora em que se atinge a maior quantidade de procura de energia diária em Portugal e em Espanha, no que concerne aos 1ºs trimestres e 3ºs trimestres, é possível observar em períodos análogos, a ocorrência do mesmo tipo de comportamento que se verifica nos preços máximos, ou seja os intervalos modais mais preponderantes da máxima procura diária e dos preços máximos diários, em cada um dos países, ocorrem em horas semelhantes.

A evolução do sector elétrico ibérico, e dos tipos de tecnologias das fontes que negoceiam maiores quantidades de energia no MIBEL, sofreu profundas alterações desde o início de funcionamento do mercado, e essas mudanças influenciam os preços máximos diários.

No ano de 2008 os preços máximos atingiram valores elevados, na maior parte das ocorrências acima de 80€/MWh. Esta subida de preços deu-se num ano de baixa pluviosidade em que as centrais hídricas produziram quantidade inferiores ao que é habitual, e como o consumo de energia se manteve praticamente constante, a satisfação da procura foi feita com recurso a centrais térmicas, em especial de centrais térmicas de gás de ciclo combinado.

O aumento de preço pode ser atribuído ao facto dos custos de produção serem mais elevados neste tipo de tecnologia e à circunstância dos agentes de mercado terem

influenciado a subida dos preços, sabendo da impossibilidade da produção em grandes quantidades de concorrentes com meios de produção através de centrais hídricas.

Nos últimos anos a capacidade instalada de outras fontes de produção teve um crescimento exponencial, sendo que a produção através de PRE, em maioria energia eólica. O aumento de preponderância destes agentes tornou o mercado menos vulnerável a flutuações deste tipo. Esta observação pode ser confirmada pelo facto de desde 2008, terem ocorrido anos de índices de pluviosidade semelhantes, e por isso quantidades mais baixas de produção de energia elétrica através de centrais hídricas, sem que se verifique um aumento substancial dos valores dos preços máximos atingidos.

Os resultados sugerem que as características da PRE, nomeadamente da produção eólica, não influenciam a hora em que ocorrem os preços máximos diários, devido a este tipo de tecnologia não permite o armazenamento do recurso para produção preferencial nas horas em que há maior procura, e previsivelmente preços mais elevados.

Os gráficos circulares dos valores de máxima produção de energia com recurso a carvão em Portugal tem uma forma mais uniforme do que em períodos análogos da mesma tecnologia em Espanha. Estes resultados sugerem que a maior distribuição de valores máximos pelas diversas horas do dia, constituindo-se como uma tecnologia de base ocorrer de forma mais visível em Portugal do que em Espanha, pode estar relacionado com o facto desse papel de tecnologia de base ser desempenhado em Espanha pela produção das centrais nucleares.

Comparando os gráficos circulares dos preços máximos diários com os gráficos circulares das diversas tecnologias, verifica-se que a máxima produção diária de energia elétrica através de fontes hídricas está diretamente relacionada com os preços máximos diários. As características deste tipo de tecnologia permitem aos operadores, gerir o recurso de modo a produzir preferencialmente nas horas em que se prevê a ocorrência de preços diários mais elevados, maximizando o lucro.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise das estratégias, que os diversos agentes de mercado adotam para influenciar os preços, por forma a maximizar os seus resultados.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

Afonso, J. (2014), "Interligações - valor na competitividade e na proteção do ambiente", XX Congresso da Ordem dos Engenheiros 2014.

APREN (2016), http://www.apren.pt/pt/dados-tecnicos-3/dados-nacionais-2/potencia-2/potencia-ligada-a-rede-dos-centros-eletroprodutores-3/, último acesso a 20 de fevereiro de 2016.

Bergin, Timothy M. (1991), " A comparison of goddness-of-fit tests for analysis of nest orientation in Western Kingbirds (Tyrannus verticalis)", Condor(1991): 164-171.

Brunsdon, Chris, e Jon Corcoran. (2005), "Using circular statistics to analyse time patterns in crime incidence", Computers, Environment and Urban Systems.

Ana Martins, Alda Carvalho, e Jorge AM Sousa. (2015), "Comparing wind generation profiles: a circular data approach", European Energy Market (EEM), 2015 12th International Conference on the. IEEE, 2015.

DGEG (2015), "Energia em Portugal - principais números", Governo de Portugal - Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia.

ERSE (2016), http://www.erse.pt/, último acesso a 20 de fevereiro de 2016.

España, R. E. (2008), "El Marco legal estable: economía del sector eléctrico español: 1988-1997", Red Electrica de España, 2006.

Estado, B. O. (1997), "Ley 54/1997", Boletín Oficial del Estado.

Estado, B. O. (2007), "Real Decreto 661/2007", Regulación de la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, Boletín Oficial del Estado.

Europeia, C. (1996), "Diretiva Europeia 96/92/CE".

Excel, M. O. (2013), Microsoft Office 2013.

Fisher, N. (1993), "Statistical analysis of circular data", Cambridge University Press.

Gill, J., & Hangartner, D. (2010), "Circular data in political science and how to handle it", Political Analysis (2010): mpq009.

Gomes, B. (2005), "Simulador dos operadores de mercado e de sistema num mercado de energia eléctrica considerando restrições intertemporais", *Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do programa do curso de mestrado em engenharia electrotécnica e de computadores*, Facudade de Engenharia da Universidade do Porto.

Gonçalves, P. J. (2012), "Análise Estatística dos Resultados do Mercado Ibérico de Eletricidade no ano de 2011", *Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Guedes, Catarina Maria Furtado Marques (2012), "A regulação no âmbito do mercado interno da electricidade: da existência de um regulador europeu único ", *Dissertação de Mestrado em Direito Administrativo na Vertente de Energia*, Facudade de Direito da Universidade Católica Portuguesa.

Jammalamadak, S. R., & SenGupta. (2001), "Topics in circular statistics", World Scientific Press, Singapore.

Mardia, K., & Jupp, P. (2000), "Directional Statistics (2nd edition)", John Wiley and Sons Ltd., 2000. ISBN 0-471 -95333-4.

Matlab (2014), Matlab R2014a.

MIBEL (2016), "Construção e Desenvolvimento": http://www.mibel.com/index.php?mod=pags&mem=detalle&relmenu=37&relcategoria=1027&idpag=68, último acesso a 19 de fevereiro de 2016.

Mourão, J. L. (2013), "Análise estatistica dos resultados do mercado ibérico de eletricidade no ano de 2012". *Dissertação realizada no âmbito do mestrado integrado em engenharia eletrotécnica e de computadores*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

OMIE (2016), http://www.omie.es/inicio, último acesso a 5 de janeiro de 2016.

OMIP (2015), http://www.omip.pt/OMIP/OMIE/tabid/71/language/pt-PT/Default.aspx, , último acesso a 11 de novembro de 2015.

Pereira, A. J. (2010), "Planeamento da Expansão do Sistema Electroprodutor em Ambiente de Mercado", *Dissertação de Tese de Doutoramento,* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

R (2014), versão 3.1.2. RStudio, Inc.

REN (2013), "Capacidades indicativas de interligação para fins comerciais para o ano 2014", REN.

República, D. (1997), "Decreto de Lei nº44/97", Diário da República.

República, D. d. (1995), "Decretos de Lei 182 a 188", Diário da República.

Rochete, G. (2015), "O Mercado Ibérico de Energia Eléctrica: O Mercado de Derivados Energéticos e as Implicações do Real Decreto 216/2014 em Portugal", *Working papers - Direito da Energia*, Universidade de Coimbra.

Sá, A. (2003), "Simulador dos Operadores de Mercado e de Sistema em Mercados de Electricidade Adoptando um Modelo AC". *Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do programa do curso de Mestrado em Engenharia Electrotécnica*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Silva, P. P. (2007), "O sector da energia eléctrica na União Europeia: evolução e perspectivas", Imprensa da Universidade de Coimbra, 2007.

Sousa, J. (2005), "Integração de mercados liberalizados de energia elétrica com aplicação ao MIBEL", *Dissertação de Doutoramento*, Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Economia.

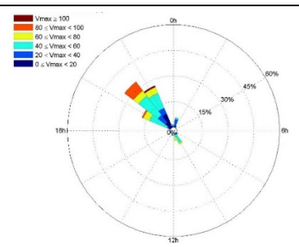
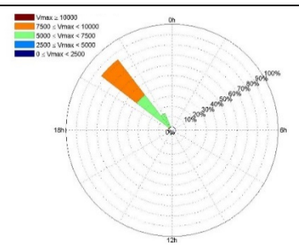
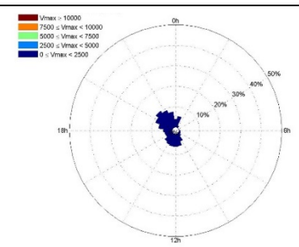
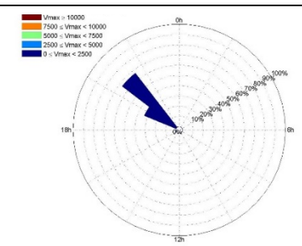
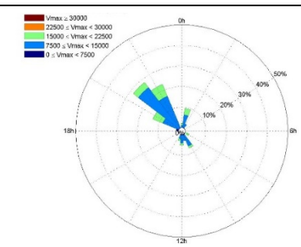
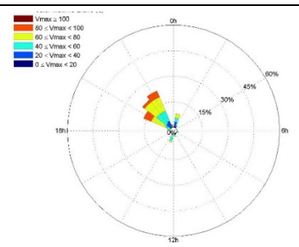
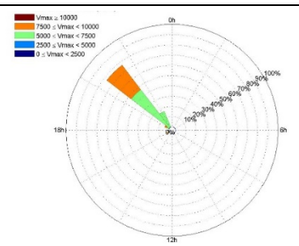
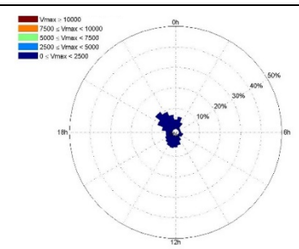
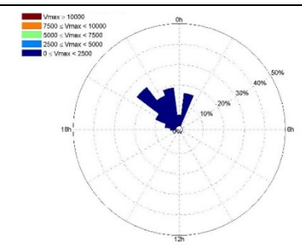
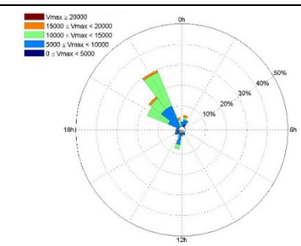
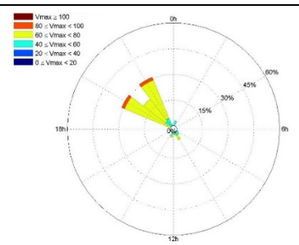
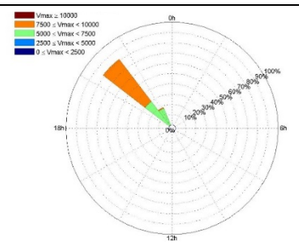
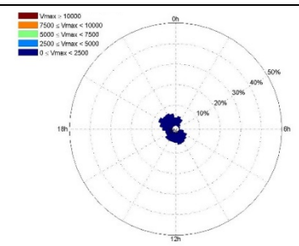
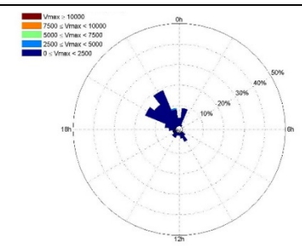
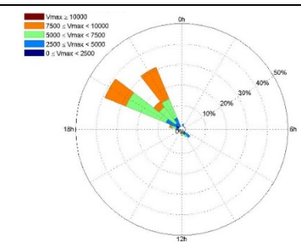
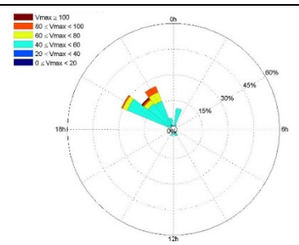
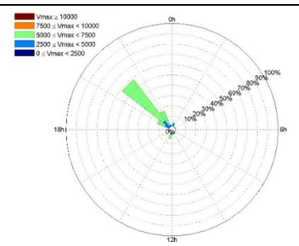
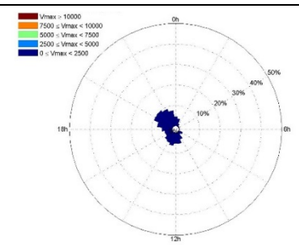
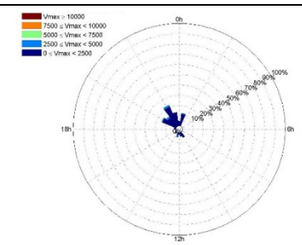
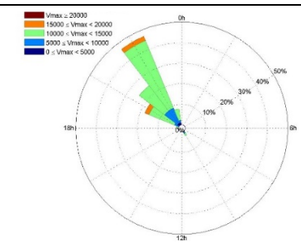
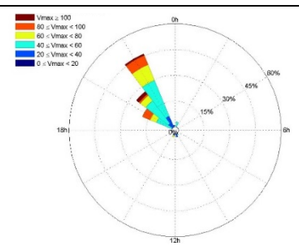
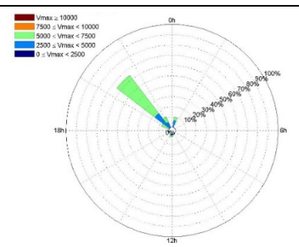
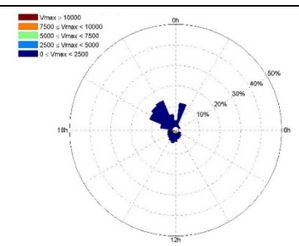
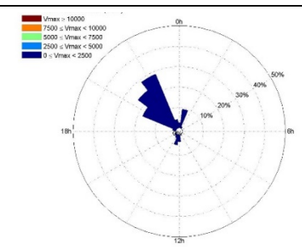
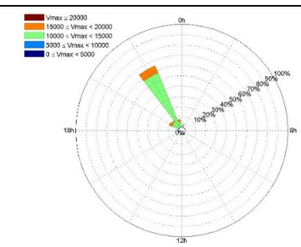
Tomé, B. (2009), "Previsão de preços de energia elétrica em mercados de eletricidade - horizonte de 24 horas", *Dissertação realizada no âmbito do mestrado em engenharia electotécnica e de computadores*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Windpower (2015), http://www.thewindpower.net, último acesso a 6 de outubro de 2015.

Anexos

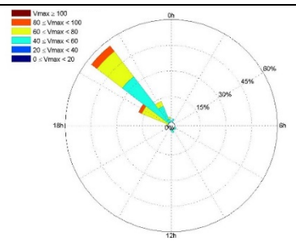
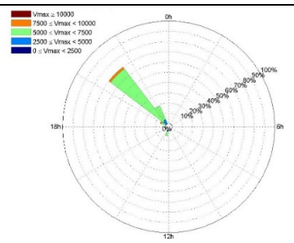
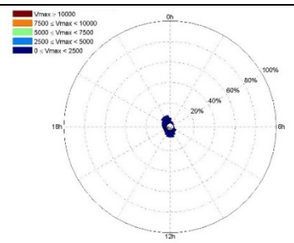
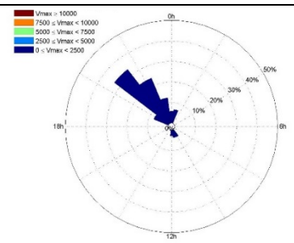
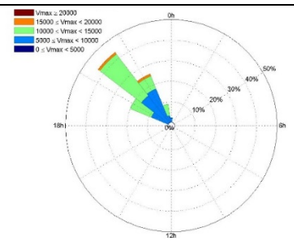
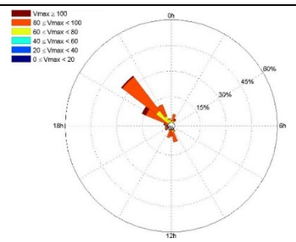
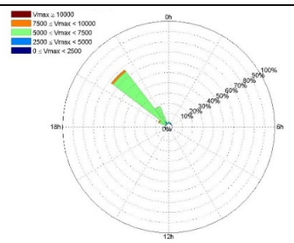
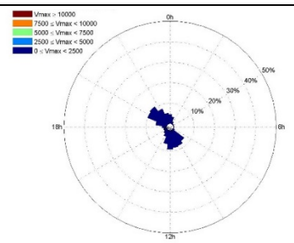
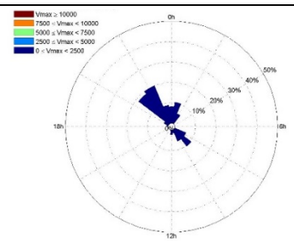
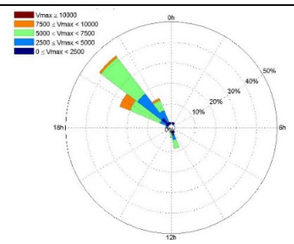
ANEXO 1 - RESUMO GRÁFICOS CIRCULARES 1ºS TRIMESTRES ENTRE 2010 E 2014 EM PORTUGAL

FREQUÊNCIA DA HORA DO VALOR MÁXIMO DIÁRIO DO PREÇO, PROCURA E PRODUÇÃO POR TECNOLOGIA NO 1º TRIMESTRE – PORTUGAL ENTRE 2010 E 2014

	PREÇO MÁXIMO DIÁRIO (€/MWh)	PROCURA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A CARVÃO MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A GÁS MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO HÍDRICA MÁXIMA (MWh)	1
						2014
						2013
						2012
						2011
						2010

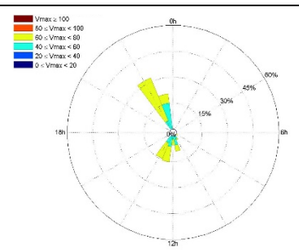
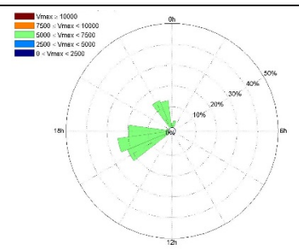
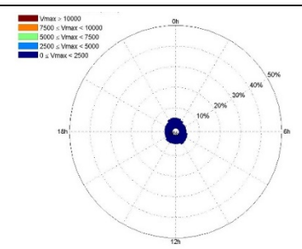
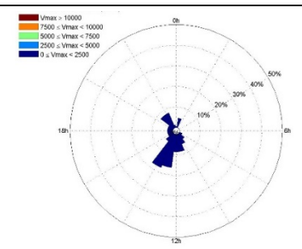
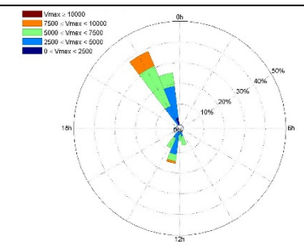
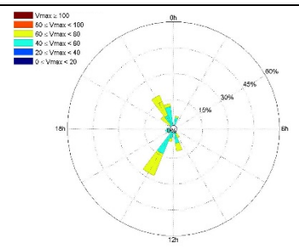
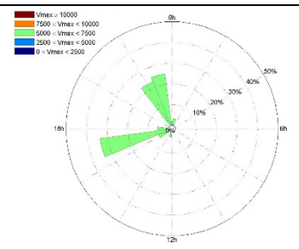
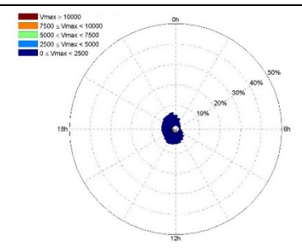
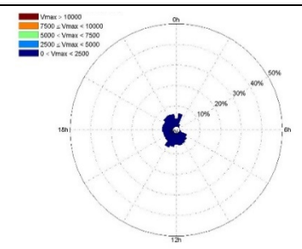
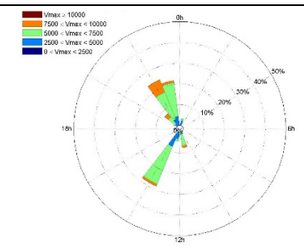
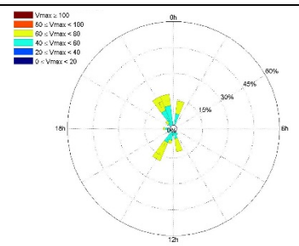
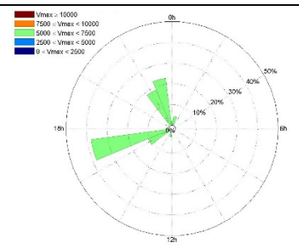
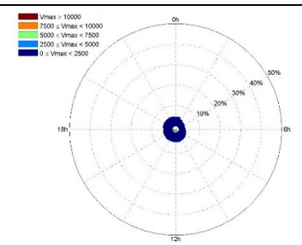
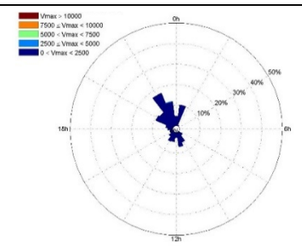
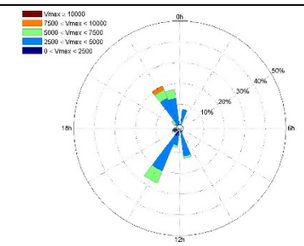
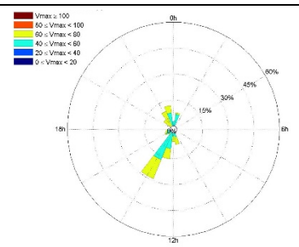
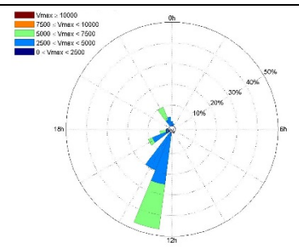
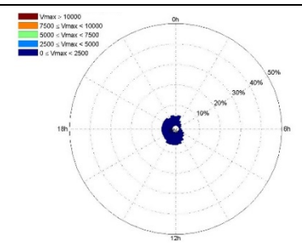
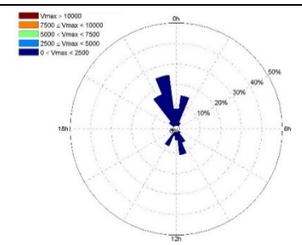
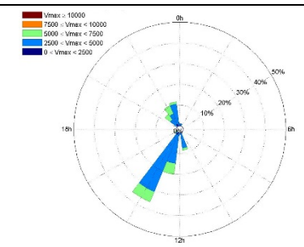
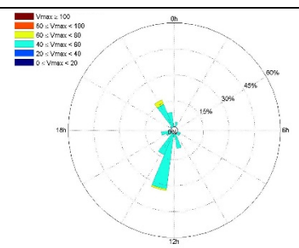
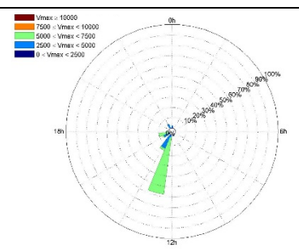
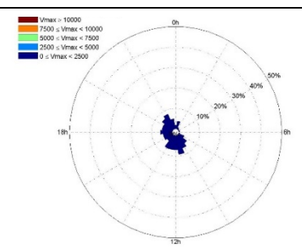
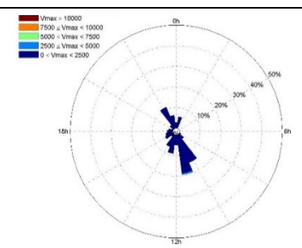
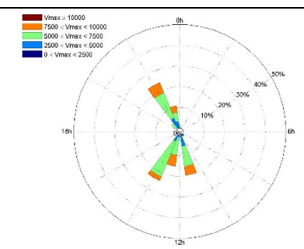
ANEXO 2 - RESUMO GRÁFICOS CIRCULARES 1ºS TRIMESTRES ENTRE 2008 E 2009 EM PORTUGAL

FREQUÊNCIA DA HORA DO VALOR MÁXIMO DIÁRIO DO PREÇO, PROCURA E PRODUÇÃO POR TECNOLOGIA NO 1º TRIMESTRE – PORTUGAL ENTRE 2008 E 2009

	PROCURA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A CARVÃO MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A GÁS MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO HÍDRICA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO PRE MÁXIMA (MWh)	2
						2009
						2008

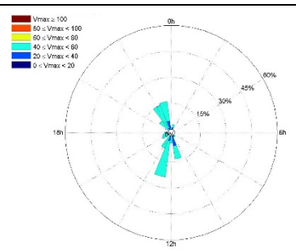
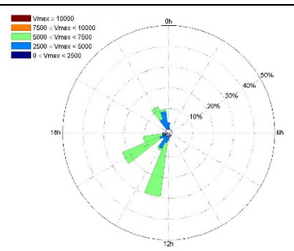
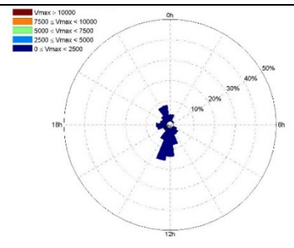
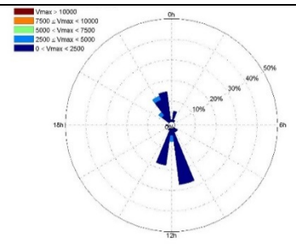
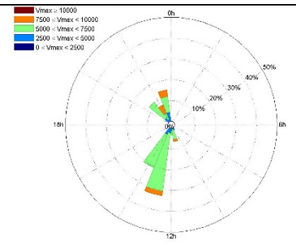
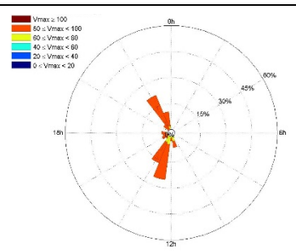
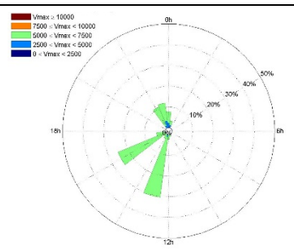
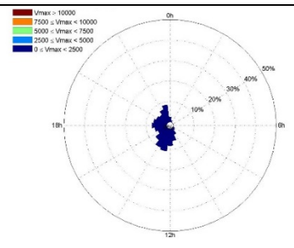
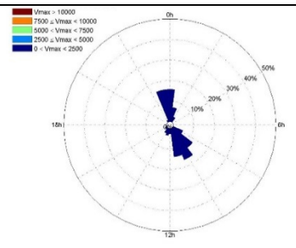
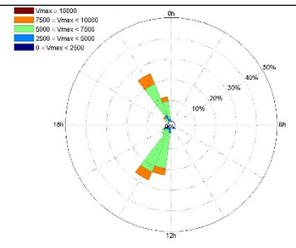
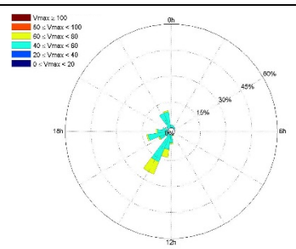
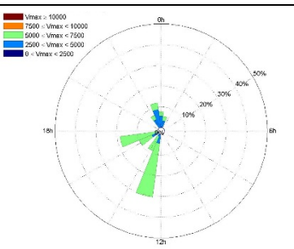
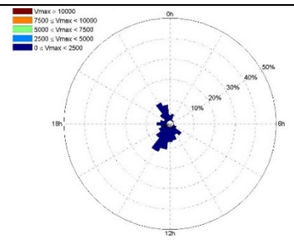
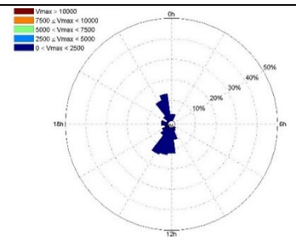
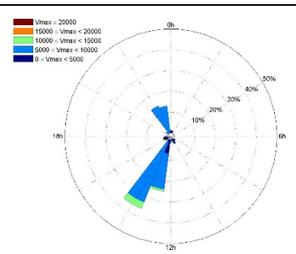
ANEXO 3 - RESUMO GRÁFICOS CIRCULARES 3ºS TRIMESTRES ENTRE 2010 E 2014 EM PORTUGAL

FREQUÊNCIA DA HORA DO VALOR MÁXIMO DIÁRIO DO PREÇO, PROCURA E PRODUÇÃO POR TECNOLOGIA NO 3º TRIMESTRE – PORTUGAL ENTRE 2010 E 2014

	PREÇO MÁXIMO DIÁRIO (€/MWh)	PROCURA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A CARVÃO MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A GÁS MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO HÍDRICA MÁXIMA (MWh)	3
						2014
						2013
						2012
						2011
						2010

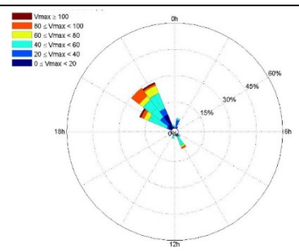
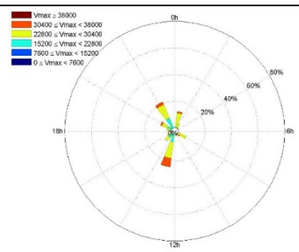
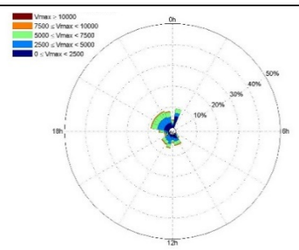
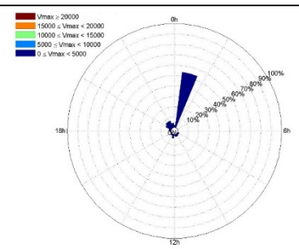
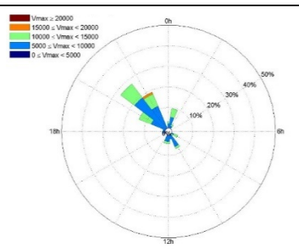
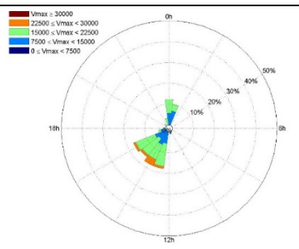
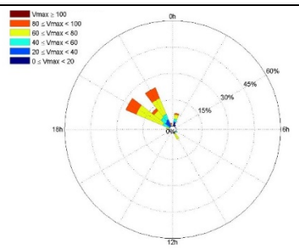
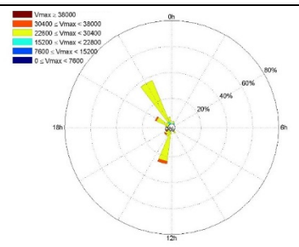
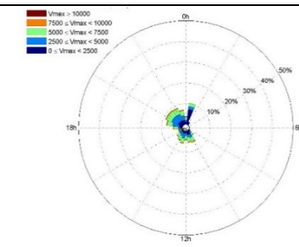
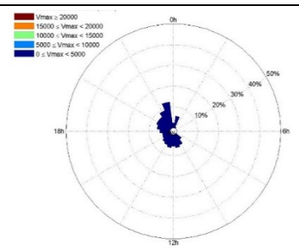
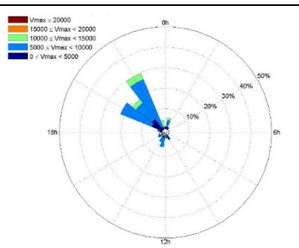
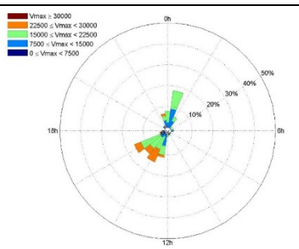
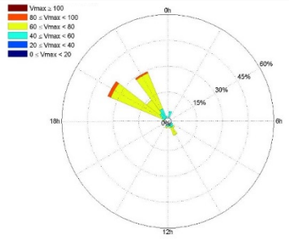
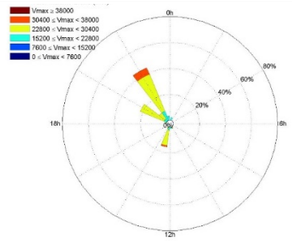
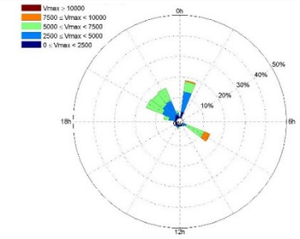
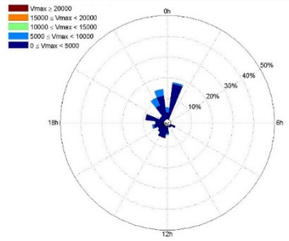
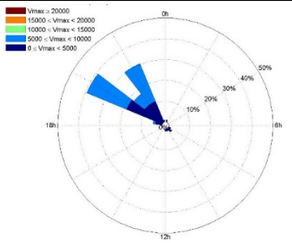
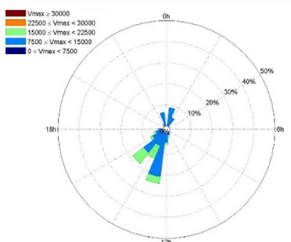
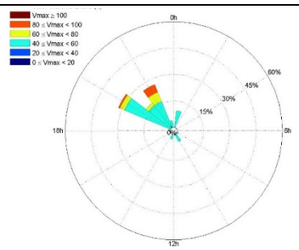
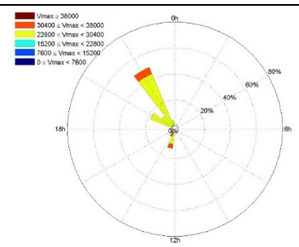
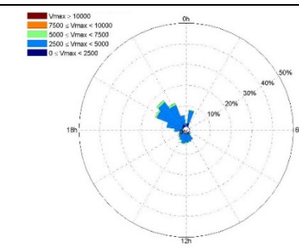
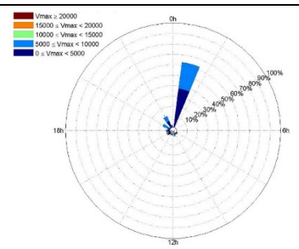
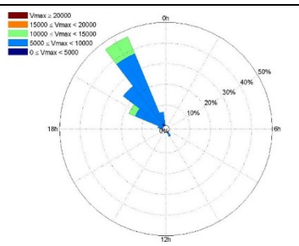
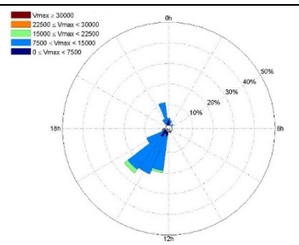
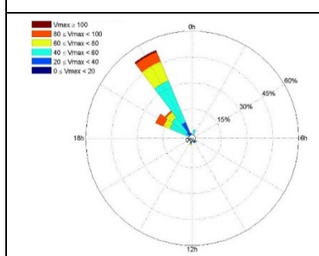
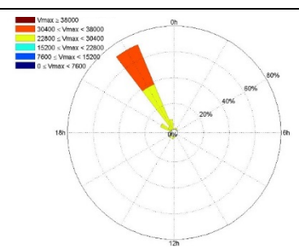
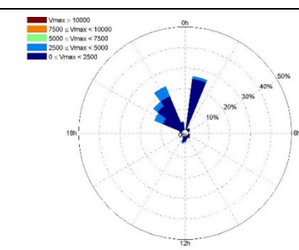
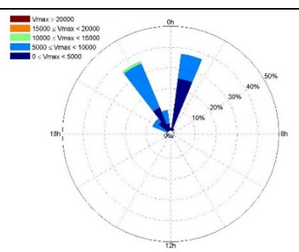
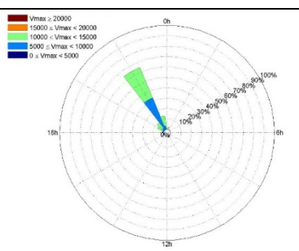
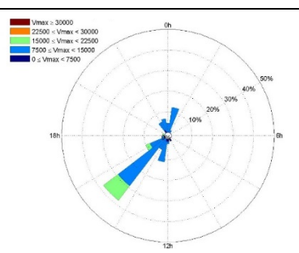
ANEXO 4 - RESUMO GRÁFICOS CIRCULARES 3ºS TRIMESTRES ENTRE 2007 E 2009 EM PORTUGAL

FREQUÊNCIA DA HORA DO VALOR MÁXIMO DIÁRIO DO PREÇO, PROCURA E PRODUÇÃO POR TECNOLOGIA NO 3º TRIMESTRE – PORTUGAL ENTRE 2007 E 2009

	PREÇO MÁXIMO DIÁRIO (€/MWh)	PROCURA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A CARVÃO MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A GÁS MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO HÍDRICA MÁXIMA (MWh)	4
						2009
						2008
						2007

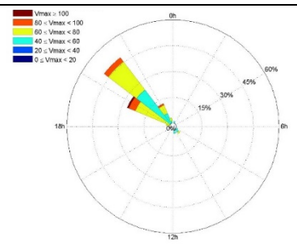
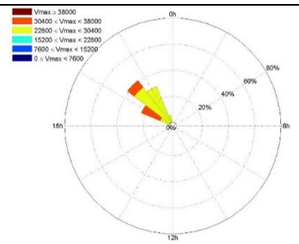
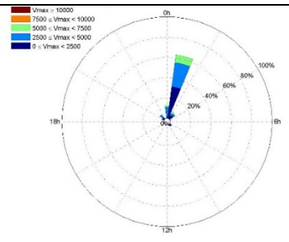
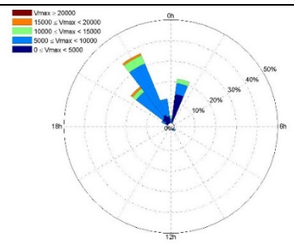
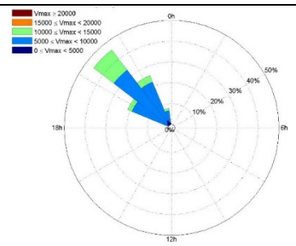
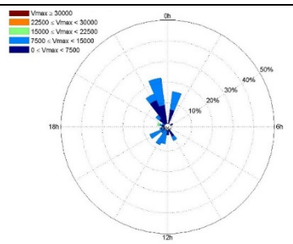
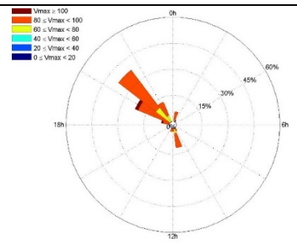
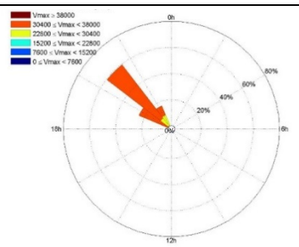
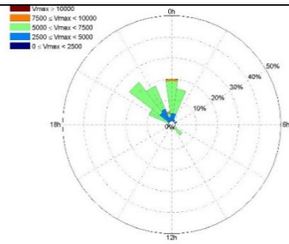
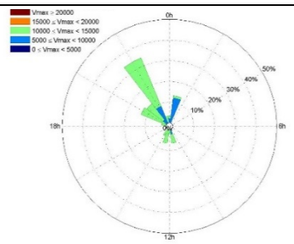
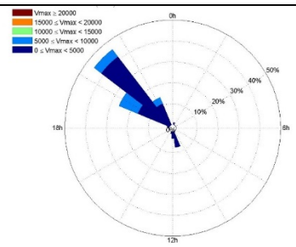
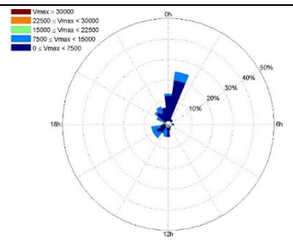
ANEXO 5 - RESUMO GRÁFICOS CIRCULARES 1ºS TRIMESTRES ENTRE 2010 E 2014 EM ESPANHA

FREQUÊNCIA DA HORA DO VALOR MÁXIMO DIÁRIO DO PREÇO, PROCURA E PRODUÇÃO POR TECNOLOGIA NO 1º TRIMESTRE – ESPANHA ENTRE 2010 E 2014

PREÇO MÁXIMO DIÁRIO (€/MWh)	PROCURA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A CARVÃO MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A GÁS MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO HÍDRICA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO PRE MÁXIMA (MWh)	5
						2014
						2013
						2012
						2011
						2010

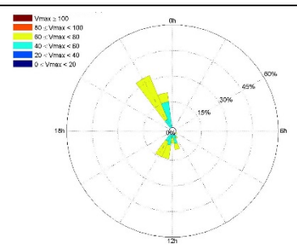
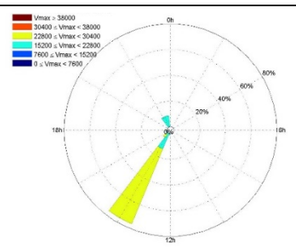
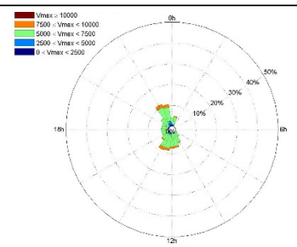
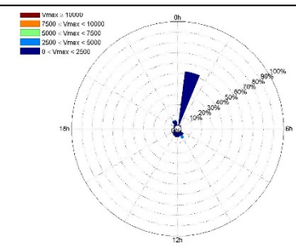
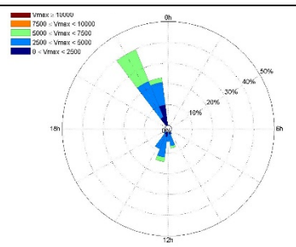
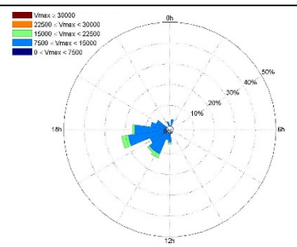
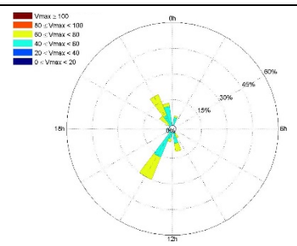
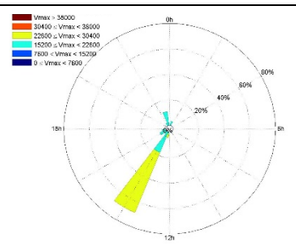
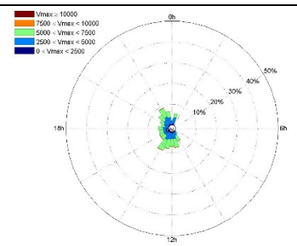
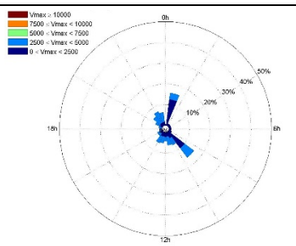
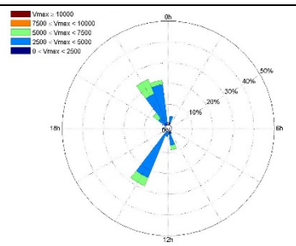
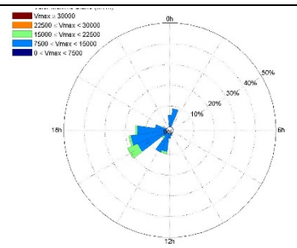
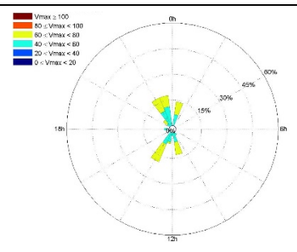
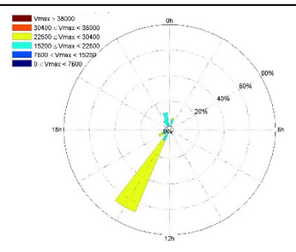
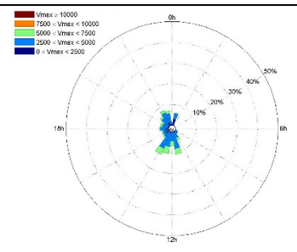
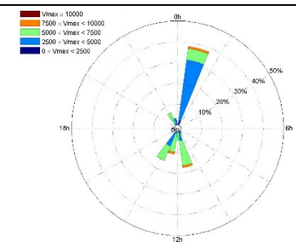
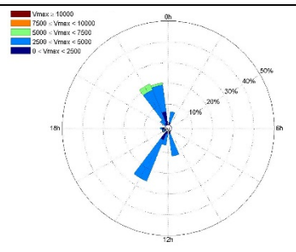
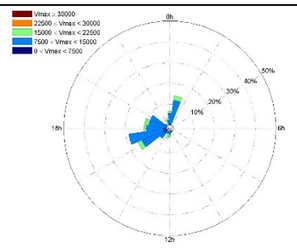
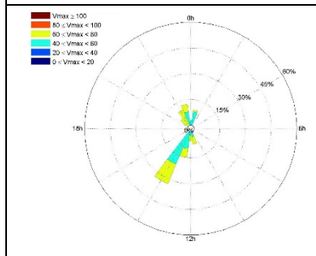
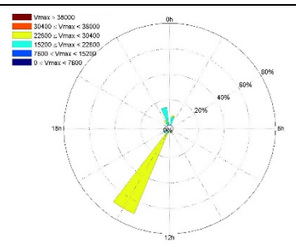
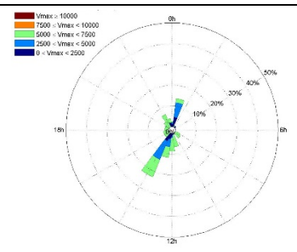
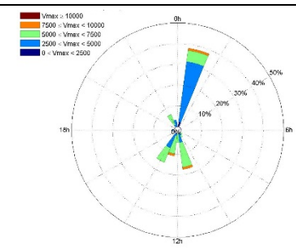
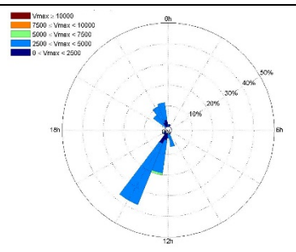
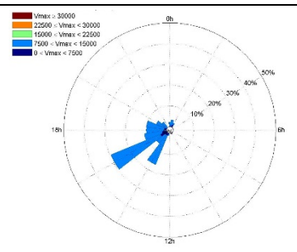
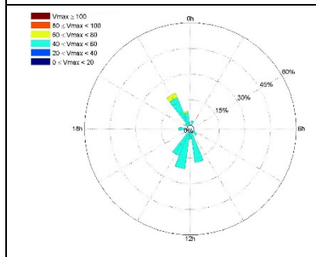
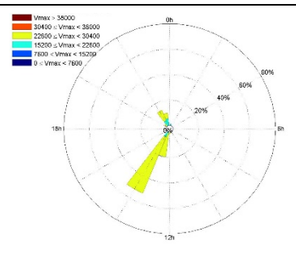
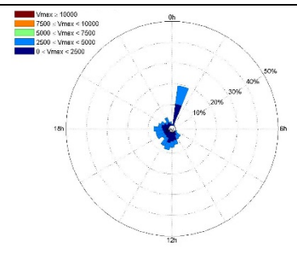
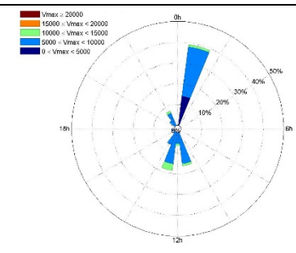
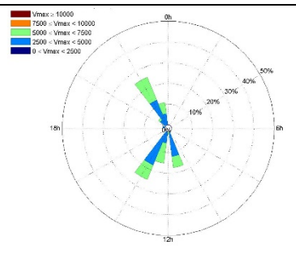
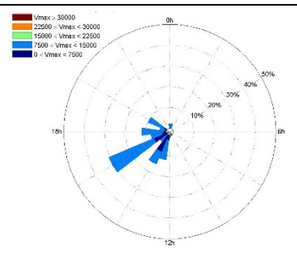
ANEXO 6 - RESUMO GRÁFICOS CIRCULARES 1ºS TRIMESTRES ENTRE 2008 E 2009 EM ESPANHA

FREQUÊNCIA DA HORA DO VALOR MÁXIMO DIÁRIO DO PREÇO, PROCURA E PRODUÇÃO POR TECNOLOGIA NO 1º TRIMESTRE – ESPANHA ENTRE 2008 E 2009

PREÇO MÁXIMO DIÁRIO (€/MWh)	PROCURA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A CARVÃO MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A GÁS MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO HÍDRICA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO PRE MÁXIMA (MWh)	6
						2009
						2008

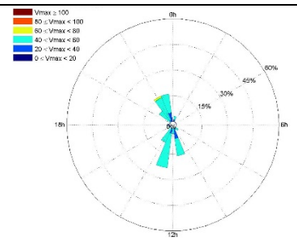
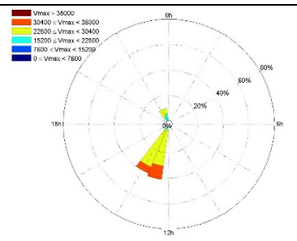
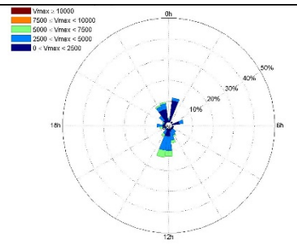
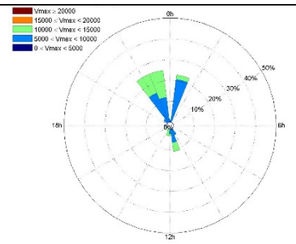
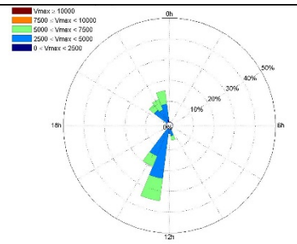
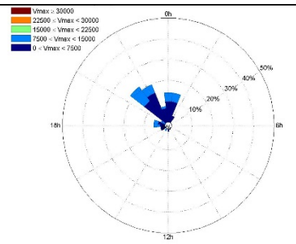
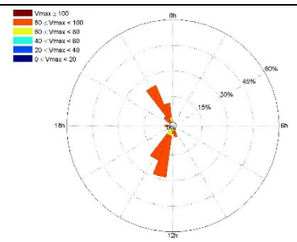
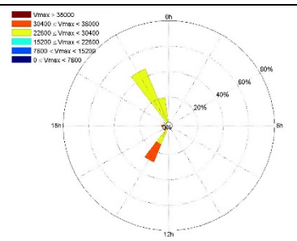
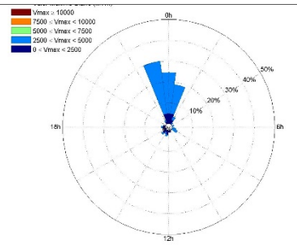
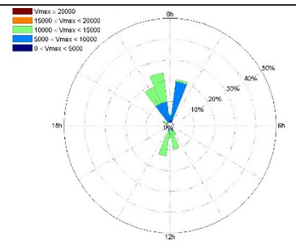
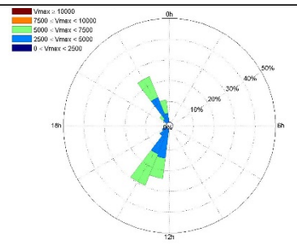
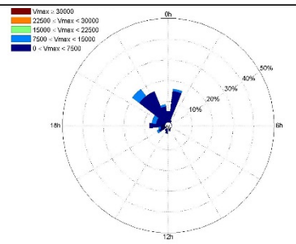
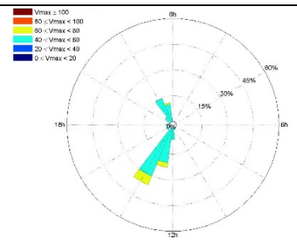
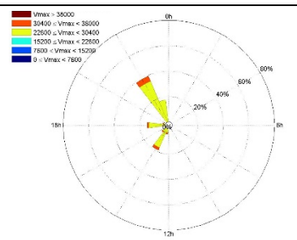
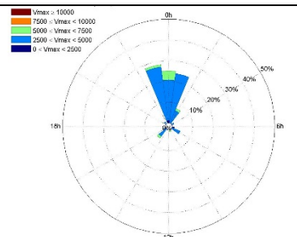
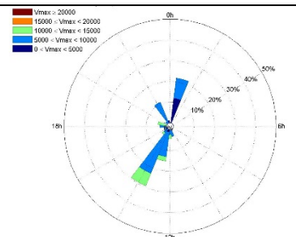
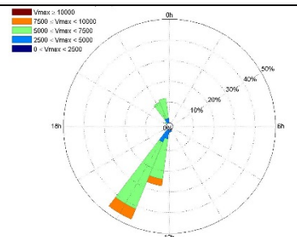
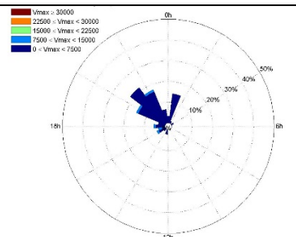
ANEXO 7 - RESUMO GRÁFICOS CIRCULARES 3ºS TRIMESTRES ENTRE 2010 E 2014 EM ESPANHA

FREQUÊNCIA DA HORA DO VALOR MÁXIMO DIÁRIO DO PREÇO, PROCURA E PRODUÇÃO POR TECNOLOGIA NO 3º TRIMESTRE – ESPANHA ENTRE 2010 E 2014

PREÇO MÁXIMO DIÁRIO (€/MWh)	PROCURA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A CARVÃO MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A GÁS MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO HÍDRICA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO PRE MÁXIMA (MWh)	7
						2014
						2013
						2012
						2011
						2010

ANEXO 8 - RESUMO GRÁFICOS CIRCULARES 3ºS TRIMESTRES ENTRE 2007 E 2009 EM ESPANHA

FREQUÊNCIA DA HORA DO VALOR MÁXIMO DIÁRIO DO PREÇO, PROCURA E PRODUÇÃO POR TECNOLOGIA NO 3º TRIMESTRE – ESPANHA ENTRE 2007 E 2009

PREÇO MÁXIMO DIÁRIO (€/MWh)	PROCURA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A CARVÃO MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO A GÁS MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO HÍDRICA MÁXIMA (MWh)	PRODUÇÃO PRE MÁXIMA (MWh)	8
						2009
						2008
						2007

Anexo 9

Modeling of cyclic events in electricity markets using circular statistical methods

Modeling of cyclic events in electricity markets using circular statistical methods

Daniel Freitas
ISEL
Lisbon, Portugal
danieltfreitas@gmail.com

Ana Martins
ISEL; BRU-UNIDE
Lisbon, Portugal
anamartins@deea.isel.ipl.pt

João Lagarto
ISEL/ADEEEA; INESC-ID
Lisbon, Portugal
jlagarto@deea.isel.ipl.pt

***Abstract*— In the current operation of electricity markets, market price and quantity present a distinct pattern between peak and off-peak hours. This pattern tends to repeat over a 24-hour time cycle. The purpose of this study is to analyze the maximum values of day-ahead market prices, considering the time of day when the maximum values are reached and the respective quantity traded. The cyclical nature of these variables allows the use of circular statistical methods that can be used to analyze any kind of data that are cyclic in nature, like time-of-day data measured on a 24h-clock. This study applies this methodology in analyzing the maximum day-ahead market prices in the Iberian electricity market (MIBEL) between 2012 and 2014 enabling the analysis over the years and between seasons. Results show that circular statistics methods enable to bring important insights into the characterization of electricity market price behavior.**

***Index Terms* - Circular statistics, Day-ahead market, Iberian electricity market, Market price.**

I - INTRODUCTION

Electricity has specific features that make its trade different from the trade of any other commodity. Among these features is the fact that it cannot be stored in an economical way in huge quantities, with the noticeable exception of storage in reservoirs of hydro power plants. Due to this, there must be a continuous balancing between generation and consumption. Also the fact that once delivered to the electrical network, electricity does not flow in the most desirable path, what may cause transmission congestions. Another important feature of electricity is the variety of technologies with different cost from which it can be produced.

Adding to those features, the inelasticity of electricity demand makes the electricity market prices to be extremely volatile and influenced by many drivers such as demand, fuel prices, strategic behavior of market participants and meteorological conditions. The extreme volatility of electricity market prices can be observed especially in hours with high demand and shortages of supply, giving raise to price spikes which are difficult to predict [1]. In this regard, [1] study the predictability of prices in Alberta, Ontario and Mid-Columbia electricity markets. For that purpose, the authors use three types of analysis: detrended fluctuation analysis, Fourier spectral analysis and probability distribution analysis. Two main findings of this study are: electricity market prices fluctuations are predictable and statistically stable.

Also dealing with the predictability of electricity market prices, [2] study the capability of neural networks to predict electricity market prices, in particular price spikes. The work is applied to five regions of the Australian National Electricity Market (NEM). The authors conclude that neural networks can capture the behavior of electricity market prices when they are not subject to extreme volatility, but they are unable to capture price spikes. In this regard, the authors use extreme value modeling fitting a Generalized Pareto distribution to capture spikes in price.

Also in a work devoted to electricity market price volatility, [3] study the impact of the creation of the Iberian Electricity Market (MIBEL) on the market price volatility using an adaptive conjectural variations model. The authors find evidence that the integration of the Portuguese and Spanish electricity markets in the MIBEL leads to less volatile market prices and thus, leads to a less risky market.

Since electricity market price behavior is subject of utmost importance, in this work we propose to use the methods of circular statistics to study the behavior of the day-ahead market price in the MIBEL, analyzing the occurrence of the maximum day-ahead market price.

This work was supported by national funds through Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) with reference UID/CEC/50021/2013

Circular statistics is a set of techniques for dealing with directional data ([4], [5], [6] and [7]) which are typically expressed as angular measurements. Although, circular statistics can be used to analyze any kind of data that are cyclic in nature, like time-of-day data measured on a 24h clock.

The circular statistics methods has been used in many fields of study. For instance, in criminology, [8], analyze the time of occurrence of crime in Cardiff, Wales, researching up patterns that repeat cyclically in daily cycles. This type of study can be used as a support tool in the organization of the police force means, as well as to prevent occurrence of crime and disorder.

More recently, in a work dealing with wind power generation [9], authors analyzed and compared alternative production profiles at different geographical locations in the Portuguese system. In this work, circular methods were used to characterize the occurrence of extreme wind power generation events, namely the maximum daily production.

This paper is organized as follows: section II details some of the features of circular statistics, section III, presents the case study, in section IV results of the application of circular statistics to the study of the maximum day-ahead prices in the MIBEL are presented and finally, section V draws conclusions.

II - CIRCULAR STATISTICS

In circular statistics observations are directions or angles and due to the circular geometry of sample space, standard statistical techniques cannot be used to model circular data (e.g. [5] and [7]).

Being a direction, a circular observation can be seen as a point on a unit ratio circumference or as a unit vector. After defining the initial direction and an orientation (clockwise or anticlockwise), the circular observation, θ, can be specified using polar coordinates (1,θ) or Cartesian coordinates (cos θ, sin θ). The observation θ can be either measured in degrees or radians.

A. Descriptives Measures

Let $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ be a sample of circular data. The center of gravity in two-dimensional space has coordinates $(\bar{C}, \bar{S})$ where $\bar{C}$ and $\bar{S}$ are the mean of X and Y coordinates, respectively, that is:

$$\bar{C} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \cos\theta_i \qquad \bar{S} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \sin\theta_i \tag{1}$$

The mean direction, $\bar{\theta}$, is defined as the angle of the vector $(\bar{C}, \bar{S})$:

$$\bar{\theta} = \begin{cases} atan(S/C), & if\ C > 0, S \geq 0 \\ atan(S/C) + 2\pi, & if\ C > 0, S < 0 \\ atan(S/C) + \pi, & if\ C < 0 \\ \pi/2, & if\ C = 0, S > 0 \\ 3\pi/2, & if\ C = 0, S < 0 \\ undefined, & if\ C = 0, S = 0 \end{cases} \tag{2}$$

where the function $atan$ is the inverse tangent function.

Another central location measure is the median, $\tilde{\theta}$. A median axis divides the circle in two slices in a way that the data is divided in two equal length groups. Then the median is the end of the median axis with more nearer data points. For a formal definition, see [4]. For quantiles determination the sample is treated as linear [4].

A simple dispersion measure is the circular range defined as the length of the shortest arc on the circle containing all the sample data.

The length of the vector $(\bar{C}, \bar{S})$, represented by $\bar{R}$, takes values in the interval [0,1], with higher values of $\bar{R}$ associated with less spread data, being $\bar{R}$=1 when all the data points are coincident [4]. However higher values of the dispersion measures are associated with higher dispersion data which is not the case of $\bar{R}$. Thus, the sample circular variance can be defined as [4]:

$$V = 1 - \bar{R} \qquad (0 \leq V \leq 1) \tag{3}$$

Furthermore, the sample circular standard deviation is given by:

$$\vartheta = \sqrt{-2log\bar{R}} \tag{4}$$

As in the linear case, circular standard deviation takes only positive values and has no upper bound. Further details on this definition can be seen in [4] or [6].

B. The Circular Uniforme and Von Mises Distributions

When dealing with circular statistics two fundamental distributions should be considered.

The circular uniform distribution reflects the case where all directions are equally spread all over the circle. The total probability is spread out uniformly and we get the circular uniform distribution (e.g. [4], [5], [6]).

When the distribution is not uniform, it is often to think on a distribution with some concentration on one (unimodal) or more (multimodal) preferred directions. The most common unimodal distribution is the circular normal distribution, also known as the von Mises distribution (e.g. [4], [5], [6]). In circular statistics the Von Mises distribution takes the role of the normal distribution in standard linear statistics. In fact, it is shaped like the normal distribution, except that its tails are truncated.

C. *Non-Parametric goodness-of-fit tests*

When analyzing circular data it is important to check if the data follow a uniform distribution, which means that there is no modal region (or regions) in the distribution of the data. In addition, many parametric procedures in circular statistics require von Mises distribution. Thus, it is also important to check if the data follow this distribution.

In assessing whether von Mises or circular uniform distributions are suited to a data-set, the Watson test can be applied [5]. Like usual goodness-of-fit tests, it compares the empirical and a reference distribution, and the null hypothesis states that the data distribution is equal to the reference distribution. The alternative hypothesis is that the sample data distribution is not the stated reference distribution.

III - CASE STUDY

In this work, we applied the methodology of circular statistics to study the maximum day-ahead prices in the MIBEL.

The data considered in this study refer to the hourly price of electricity, in €/MWh, observed in the MIBEL for Portugal and Spain, between 2011 and 2014. Two annual periods were considered: The 1st quarter (January, February and March) and the 3rd quarter (July, August and September). The choice of these annual periods, 1st and 3rd quarters, was made taking into account the conditions of the two countries under study, and their behaviour in periods where variations in economic, sociocultural and weather may occur, having an effect on the consumption and production of electricity affecting the hours where the daily maximum prices are attained. The data was obtained from the Iberian Market Operator – Spanish pole [10]

These data were converted into circular variables as with 0:00 corresponding to 90º, 6:00 to 0º, 12:00 to 270º and 18:00 to 180º.

The descriptive measures and the non-parametric goodness-of-fit tests were performed with software R [11].

For a better analysis, wind rose diagrams of the data considered were produced with software Matlab [12].

Furthermore, similar variables were considered as the hour of the day where the maximum values are attained for demand and production by technology, namely hydro, coal, CCGT and Special Regime Production (production from CHP, wind, photovoltaic, small hydro, etc.).

When dealing with different variables, it is important to analyze the relations between them. One approach could be the circular correlation coefficient. However this measure is not suitable for this case study data due to the daily maximum values can be reached in a number of different hours for the two variables. This fact also makes not possible the use of Kappa index for measuring the agreement between the hours of the day where the maximums are attained for two variables. Thus one purpose the use of the agreement percentage between the two variables as a similarity measure between two variables.

IV - RESULTS

Although the analysis in this study had been performed for the 1st and 3rd quarters of 2012 to 2014, we will only present the wind rose diagrams for some results of 2014, once for the remaining years the patterns are similar. In this sense, Fig.1 and 2 present the wind rose diagrams of the hour of the day where the maximum day-ahead price is attained in the 1st and 3rd quarters of 2014, for Portugal and Spain, respectively.

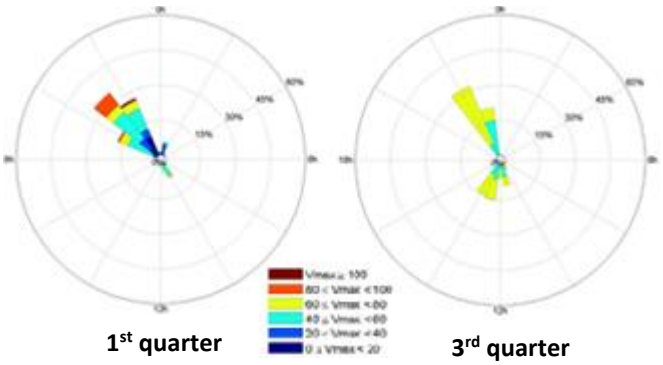


Figure 1 – Wind rose diagram of the hour of the day where the maximum day-ahead price is attained in Portugal in the 1st and 3rd quarters of 2014

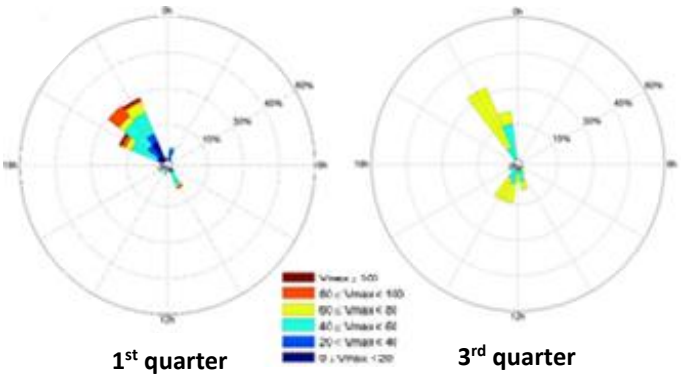


Figure 2 – Wind rose diagram of the maximum day-ahead price in Spain in the 1st and 3rd quarters of 2014

From Fig. 1 and 2, it can be observed that the wind rose diagrams for Portugal and Spain are very similar. In the 1st quarter the higher frequency of maximums occurred in the range of hours 20 to 22 and in the 3rd quarter the higher frequency occurred around hours 13, 14 and hour 22. In addition, it can be observed that in the 1st quarter the maximum price's values are higher.

The observations made through the wind rose diagrams are supported by the location measures results presented in Table I and by the dispersion measures results presented in Table II with the exception of the 3rd quarter of 2012.

In Table I, it is possible to state that the number of occurrences is not always coincident between the two countries as well as varies over the year and quarter, since the daily number of maximums is not constant. It can also be observed in Table I, that the mean hour where the maximum day-ahead

market prices occur are close to 21:00 in the 1st quarter which is the hour with higher frequency whereas in the 3rd quarter the mean value is between the hours where the higher frequency of maximums occurred.

TABLE I - LOCATION MEASURES

			Sample Size	Mean	$Q_{0.25}$	Median	$Q_{0.75}$
2012	**1st Q**	PT	104	20:51	20:00	21:00	22:00
		SP	103	20:48	20:00	20:00	22:00
	3st Q	PT	105	19:42	13:59	22:00	22:00
		SP	107	19:34	13:59	21:00	22:59
2013	**1st Q**	PT	101	21:18	20:00	21:00	22:59
		SP	98	21:14	20:00	21:00	22:00
	3st Q	PT	110	17:16	13:59	16:00	22:00
		SP	107	17:10	13:59	13:59	22:00
2014	**1st Q**	PT	106	21:16	20:00	21:00	22:00
		SP	106	21:17	20:00	21:00	22:00
	3st Q	PT	112	18:31	12:59	22:00	22:00
		SP	112	18:44	12:59	22:00	22:00

Also, the results presented in Table II show that the hourly dispersion of the maximums, given by either the range or the standard deviation is higher in the 3rd quarter than in the 1st.

Moreover, statistics results of Table I and Table II show many similarities regarding the occurrence of the maximum day-ahead price in Portugal and Spain. In addition, the agreement percentages between the hours where the maximum day-ahead market prices occur in these two countries were computed and results are presented in Table III. These results indicate a very high level of agreement between the maximum day-ahead market prices in Portugal and Spain and a higher agreement percentage in the 3rd quarter than in the 1st. This is an expected result once the Portuguese and Spanish markets are integrated in the MIBEL and though there are some hours where the market prices in both countries are different due to the congestion management mechanism put in place (market splitting), those hours represented less than 10% of the hours in the analyzed period.

TABLE II - DISPERSION MEASURES

			Range [hr]	Standard Deviation [rad]
2012	**1st Q**	PT	13	0.819
		SP	13	0.905
	3st Q	PT	15	1.601
		SP	15	1.650
2013	**1st Q**	PT	12	0.708
		SP	15	0.643
	3st Q	PT	15	1.464
		SP	15	1.511
2014	**1st Q**	PT	13	0.823
		SP	13	0.854
	3st Q	PT	15	1.589
		SP	15	1.578

The Watson test was performed in order to test if any of the samples follow a circular uniform distribution. The results indicate that the circular uniform distribution is not suitable to describe any one of the empirical distributions (in all cases, p-value<0.01). These results underline that these samples not all directions are equally spread all over the circle which is already been suggested by the analyses of the circular histograms presented in Fig 1 and 2. Furthermore, the Watson test was also performed using the von Mises distribution. The conclusion is that none of the data sets have been drawn from a population with von Mises distribution (in all cases, p-value<0.01).

TABLE III - AGREEMENT PERCENTAGE BETWEEN MAXIMUM DAY-AHEAD MARKET PRICES IN PORTUGAL AND SPAIN

2012		2013		2014	
1st Q	**3st Q**	**1st Q**	**3st Q**	**1st Q**	**3st Q**
84%	96%	71%	95%	85%	99%

In order to deepen the analysis of the maximum day-ahead prices, wind rose diagrams were created for the maximum values of demand and production by technology, namely hydro, coal, CCGT and Special Regime Production (production from CHP, wind, photovoltaic, small hydro, etc.). Also an agreement analysis between those values and the maximum day-ahead market prices was performed.

Fig. 3 presents the wind rose diagrams of the maximum values of the market demand and maximum values of hydro production in Portugal in the 1st quarter of 2014.

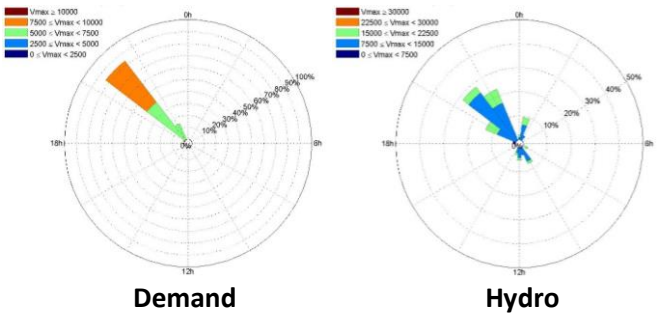


Figure 3 – Wind rose diagrams of the maximum values of the market demand and hydro production in Portugal in the 1st quarter of 2014

Fig. 4 presents the wind rose diagrams of the maximum values of coal production in Portugal and Spain.

Tables IV and V present the agreement percentages between the hours where the maximum day-ahead market prices occur and the hours where it is attained the daily maximum demand and production by technology for Portugal and Spain, respectively.

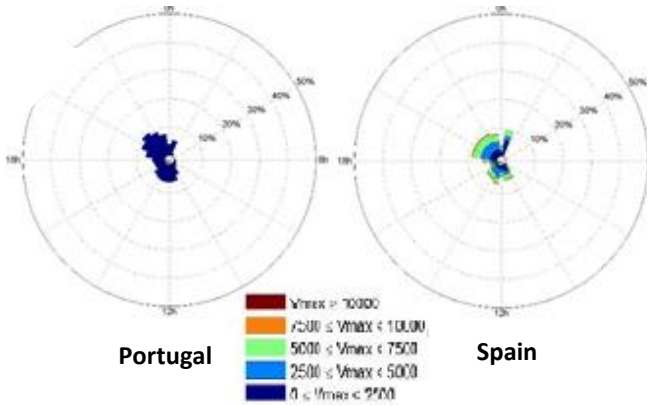


Figure 4 – Wind rose diagram of the maximum values of coal production in Portugal and Spain in the 1st quarter of 2014

Comparing Fig. 1 for the 1st quarter and Fig. 3, it can be seen that the higher frequency of maximums occurs around the same hours 21:00. However, for demand in Spain, this is not the case in the 1st quarter of 2013 and 2014.

TABLE IV - AGREEMENT PERCENTAGE BETWEEN MAXIMUM DAY-AHEAD MARKET PRICES FOR PORTUGAL AND DEMAND AND PRODUCTION BY TECHNOLOGY

		Demand	Coal	CCGT	Hydro
2012	**1st Q**	27%	3%	43%	63%
	3st Q	23%	2%	23%	61%
2013	**1st Q**	40%	2%	34%	51%
	3st Q	21%	4%	11%	67%
2014	**1st Q**	43%	5%	15%	55%
	3st Q	17%	3%	13%	71%

The pattern that can be observed in the maximum values of hydro production reflects the fact that generating companies try to sell their hydro production, from those power plants with reservoir capacity, in hours where the prices are higher in order to increase profits. This fact can also be seen in Tables IV and V, where the agreement percentage between maximum values of hydro production and day-ahead market price is the highest.

TABLE V – AGREEMENT PERCENTAGE BETWEEN MAXIMUM DAY-AHEAD MARKET PRICES FOR SPAIN AND DEMAND AND PRODUCTION BY TECHNOLOGY

		Demand	Coal	CCGT	Hydro	SRP
2012	**1st Q**	40%	27%	19%	68%	1%
	3st Q	32%	24%	23%	65%	0%
2013	**1st Q**	14%	12%	10%	49%	0%
	3st Q	38%	21%	12%	69%	3%
2014	**1st Q**	11%	21%	13%	49%	0%
	3st Q	26%	19%	13%	66%	1%

Another interesting observation that can be seen in Fig. 4 is the fact that the maximum values of coal production in Portugal and Spain have different patterns. Moreover, for Portugal, the maximum values of coal production are similar in all hours of the day (denoted by the same color in the diagram). Also the index of agreement between maximum day-ahead market prices and maximum coal production presents higher values for Portugal than for Spain. This reflects the fact that coal technology has a more pronounced role as a baseload technology than in Spain, in which this role is played more by nuclear.

Regarding SRP, as expected the agreement percentage between maximum production of SRP and maximum day-ahead market prices is the lowest, reflecting the non-dispatchable nature of the technologies that compose SRP.

V - CONCLUSIONS

This work proposed the use of circular statistics methods to study the behavior of the day-ahead market price in the MIBEL, between 2012 and 2014, analyzing the occurrence of the maximum day-ahead market price.

Results showed a similar behavior of the maximum day-ahead market prices in Portugal and Spain due to the integration of these to markets in MIBEL. Also the agreement percentage computed showed a high agreement between maximum hydro production and maximum day-ahead market prices indicating that generating companies sell their hydro production when prices are higher in order to increase profits.

As a whole, results showed that circular statistics methods are suitable techniques to study electricity market prices behavior enabling to bring important insights into the its characterization.

REFERENCES

[1] O.Y. Uritskaya, and V. M. Uritsky, "Predictability of price movements in deregulated electricity markets," *Energy Economics*, vol. 49, pp. 72-81, 2015.

[2] P. Dev, and M. A. Martin, "Using neural networks and extreme value distribution to model electricity pool prices: Evidence from the Australian National electricity Market 1998-2013," *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 122-132, 2014.

[3] J. Sousa, J. Lagarto, and R. Pestana, "Spot price simulation and volatility analysis in the future Iberian Electricity Market," in *Proc. 2005 15th Power Systems Computation Conference*, pp. 1-6.

[4] Fisher, NI. (1993). Statistical Analysis of Circular Data. Cambridge University Press. ISBN 0-521-35018-2.

[5] Jammalamadaka, S. Rao; Sengupta, A. (2001). Topics in Circular Statistics. World Scientific Publishing Company. ISBN 978-981-02-3778-3.

[6] Mardia, KV. and Jupp P., Directional Statistics (2nd edition), John Wiley and Sons Ltd., 2000. ISBN 0-471-95333-4.

[7] Lee, A. (2010). Circular data. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, Vol. 2, Issue 4, 477–486.

[8] C. Brundson, and J. Corcoran, "Using circular statistics to analyse time patterns in crime incidence," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 30, pp. 300-319, 2006

[9] A. Martins, A. Carvalho, and J. Sousa, "Comparing wind generation profiles: A circular data approach," in *Proc. 2015 12th International Conference on the European Energy Market – EEM15*, pp 1-6.

[10] Iberian Electricity Market operator – OMIE, [Online]. Available: www.omie.es.

[11] R software - https://www.r-project.org/

[12] Matlab Software - http://www.mathworks.com/products/matlab/