

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**FEUP**

**Previsão a curto e médio prazo de preços em  
mercado de carbono**

Filipe Manuel de Almeida Lopes

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

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Monteiro

Junho de 2010

© Filipe Manuel de Almeida Lopes, 2010

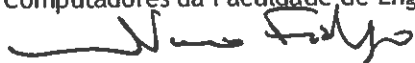
**A Dissertação intitulada**

**“PREVISÃO A CURTO E MÉDIO PRAZO DE PREÇOS EM MERCADO CARBONO”**

foi aprovada em provas realizadas em 20/Julho/2010

**o júri**

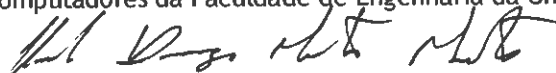
**Presidente Professor Doutor José Nuno Moura Marques Fidalgo**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharias Electrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Professor Doutor Rui Manuel Gameiro de Castro**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica  
de Lisboa

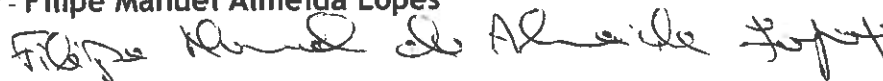


**Professor Doutor Cláudio Domingos Martins Monteiro**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

**Autor - Filipe Manuel Almeida Lopes**





# Resumo

A presente dissertação aborda o estudo inerente à possibilidade de criação de um modelo de previsão a curto e médio prazo de preços em mercado de carbono.

O meio ambiente e as alterações climáticas, cada vez mais, assumem um papel mediático e importante no nosso quotidiano. De facto, todos nós testemunhámos há vários anos até esta parte, pelos vários meios de comunicação social, os efeitos comprovados, na atmosfera, dos gases de efeito de estufa.

Não obstante, desde os princípios dos anos 90 que a comunidade científica alerta para o aumento dos níveis de concentração de CO<sub>2</sub> e os possíveis efeitos nefastos deste aumento. De tal maneira que em 1997 o Protocolo de Quioto foi assinado. Neste protocolo os vários países assinantes comprometeram-se com limites na emissão de gases poluentes.

Uma ferramenta introduzida pela União Europeia, para responder às necessidades que advêm dos compromissos estabelecidos no Protocolo de Quioto, foi o Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE). Esta ferramenta permite a compra e venda de créditos de emissão de CO<sub>2</sub> conforme as necessidades dos vários participantes deste mercado.

Desde 2008 e até 2012, a União Europeia têm que cumprir com o objectivo de redução em 8% das emissões de CO<sub>2</sub>, sendo que o CELE desempenha um papel fulcral no cumprimento desses objectivos.

Nesta dissertação começa-se por se apresentar um resumo de investigações já feitas em relação a modelos de previsão de preços em mercados de “commodities” como o petróleo e a electricidade, expõem-se também estudos relativos à causalidade entre o CELE e outros factores influentes na variação do preço das licenças de emissão, as chamadas European Union Allowances (EUAs). É depois apresentada uma análise cuidada e inédita dos factores que influenciam a variação dos preços das licenças de emissão desde 2008 até meados de 2010. Como resultado final apresenta-se um modelo de previsão eficaz e robusto, com a capacidade de previsão num horizonte de três dias, baseado em redes neuronais, do preço em mercado spot do preço das EUAs.

**Palavras-chave:** CELE, EUA, Redes Neuronais, Modelos de Previsão.



# Abstract

This thesis describes the study inherent in the possibility of creating a model for predicting the short and medium term prices in the carbon market.

The environment and climate change assume an increasingly important role in the media and our everyday lives. In fact, we all witnessed for several years until this part, through the various media channels, the proven effect in the atmosphere of greenhouse gases. Nevertheless, since the early '90s that the scientific community warns of rising levels of CO<sub>2</sub> concentration and the adverse effects of this increase. So that in 1997 the Kyoto Protocol was signed, and in this protocol the various signatory countries committed themselves to comply with limits on greenhouse gas emissions.

A tool introduced by the European Union was the European Union Emissions Trading Scheme(EU ETS). This tool allows the purchase and sale of emission credits CO<sub>2</sub> according to the needs of various participants in this market.

From 2008 until 2012, the European Union has to comply with the objective of 8% reduction in CO<sub>2</sub> emissions, while the EU ETS has a pivotal role in meeting these objectives. This dissertation starts by presenting a summary of the investigations already made in relation to models of forecast prices in markets for commodities like oil and electricity, also sets out studies on the causality between the EU ETS and other factors that influence the variation in the price of the emissions licenses, the so called European Union Allowances (EUAs). It then presents a careful and unheard analysis of factors influencing the change in prices of allowances from 2008 until mid 2010. As a final result it's presented a effective and robust model for predicting the price in the spot market price of EUAs, with the ability to forecast a horizon of three days, based on neural networks.

**Keywords:** EU ETS, EUA, Forecasting Models, Neural Networks.



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Doutor Cláudio Monteiro pelo vital e incessante apoio no decorrer da elaboração deste trabalho.

À Dra. Rita Sousa que me ajudou de forma muito generosa a compreender o funcionamento do CELE, assim como também agradeço muito todas as sugestões que me fez na revisão desta dissertação.

Aos meus amigos que durante este semestre estiveram, no mesmo espaço que eu, a elaborar também dissertações. As suas opiniões foram guias importantes na minha investigação.

À minha namorada um agradecimento muito especial pois foi fonte de motivação em alturas mais complicadas.

Por último, mas em primeiro plano, gostaria de agradecer de forma especial à minha família, principalmente à minha mãe e irmão, fontes de paciência e apoio incondicional no decorrer do meu mais importante projecto: a vida.



*“A verdadeira medida de um homem não é como ele se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas como ele se mantém em tempos de controvérsia e desafio.”*

Martin Luther King



# Índice

Resumo .....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos .....	vii
Índice.....	xi
Lista de Figuras .....	xv
Lista de Tabelas .....	xix
Abreviaturas e Símbolos .....	xxi
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento .....	1
1.1.1 - Redução das Emissões .....	2
1.1.2 - Mecanismos de Mercado.....	3
1.1.2.a - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.....	3
1.1.2.b - Implementação Conjunta .....	4
1.1.2.c - Comércio de Emissões .....	4
1.1.2.c.1. Comércio Europeu de Licenças de Emissão .....	4
1.2 - Motivação .....	6
1.3 - Objectivos.....	6
1.4 - Estrutura da Dissertação.....	7
1.5 - Informação Usada na Dissertação .....	7
1.5.1 - Fontes de Mercado .....	7
1.5.2 - Fontes Estatísticas .....	7
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>9</b>
Estado da arte .....	9
2.1 - Introdução.....	9
2.2 - Previsão de Preços de Petróleo .....	10
2.3 - Previsão de Preços de Electricidade.....	11
2.4 - Variáveis Explicadoras do Preço das EUAs .....	13
2.4.1 - Variáveis Explicadoras do Preço das EUAs-1ºPeríodo .....	13
2.4.2 - Variáveis Explicadoras do Preço das EUAs-2ºPeríodo .....	15
2.5 - Modelagem da dinâmica do Preço EUA .....	16
2.5.1 - Modelos Econométricos.....	16
2.5.1.a - Modelos Arch/Garch .....	16
2.5.1.b - Modelos baseados em movimentos Brownianos .....	17
2.5.2 - Modelos Híbridos.....	17

2.6 - Redes Neurais aplicadas às técnicas de previsão .....	18
2.6.1 - Estrutura das Redes Neurais.....	18
2.6.2 - Funcionamento de um Neurónio.....	18
2.6.3 - Arquitectura das Redes Neurais .....	19
2.6.4 - Aprendizagem das Redes Neurais.....	19
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>21</b>
Análise de Variáveis .....	21
3.1 - Introdução .....	21
3.2 - Planos de Alocação Nacional .....	22
3.2.1 - Alocação e Emissões Verificadas-2008/2009 .....	22
3.2.2 - Influência dos Planos de Alocação Nacional no Preço das EUAs .....	24
3.2.3 - Planos de Alocação Nacional-Observações Finais.....	26
3.3 - Índices de produção industrial Vs Preço EUA .....	27
3.3.1 - Motivação para Análise .....	27
3.3.2 - Estudo da Correlação .....	28
3.4 - Preço do Petróleo Vs Preço EUA .....	30
3.4.1 - Motivação para Análise .....	30
3.4.2 - Estudo da Correlação .....	31
3.5 - Preço da Energia Eléctrica Vs Preço EUA.....	34
3.5.1 - Motivação para Análise .....	34
3.5.2 - Análise da Correlação .....	35
3.6 - Euronext 100 Vs Preço EUA .....	37
3.6.1 - Motivação para Análise .....	37
3.6.2 - Análise de Correlação .....	38
3.7 - Análise Isolada da Série Preço da EUA .....	40
3.7.1 - Motivação para Análise .....	40
3.7.2 - Análise de Correlação .....	40
3.8 - Conclusões Finais .....	42
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>43</b>
Modelo de Previsão .....	43
4.1 - Introdução .....	43
4.2 - Descrição do modelo .....	43
4.3 - Conjunto de Treino.....	48
4.4 - Configuração da Rede Neuronal.....	50
4.5 - Avaliação do Modelo .....	50
4.6 - Resultados .....	51
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>55</b>
Conclusão .....	55
5.1 - Conclusões Finais .....	55
5.2 - Investigações Futuras .....	56
<b>Referências .....</b>	<b>59</b>
<b>Apêndice: Variáveis Analisadas .....</b>	<b>63</b>
6.1-Preço do Gás Natural .....	63
6.2-Preço Electricidade Nordpool Vs Preço EUA .....	64





## Lista de Figuras

Figura 1.1 Metas para Emissões de CO2 [4] .....	3
Figura 1.2-Calendarário CELE .....	6
Figura 2.1-Modelo de Previsão de Preços de Petróleo [15].....	10
Figura 2.2-Resultados do Modelo de Previsão [18].....	10
Figura 2.3-Estrutura Modelo Previsão [21]. .....	12
Figura 2.4-Resultados Previsão Horária Electricidade [21]. .....	12
Figura 2.5-Preço EUA Spot 1ºPeríodo [23] .....	13
Figura 2.6-EUAs Alocadas por Indústria [25]. .....	14
Figura2.7-Interdependência entre variáveis explicadoras do PEUA no 2º Período do CELE [28] .....	16
Figura 2.8-Modelo Híbrido de previsão do PEUA [34].....	17
Figura 2.9-Rede Multilayer FeedForward [42]. .....	18
Figura 2.10-Funções de Transferência [51] .....	19
Figura3.1-Alocação de EUAs e Emissões verificadas 2008/2009[43] .....	22
Figura 3.2-Alocação/Emissões Verificadas por Sector 2008 [43] .....	23
Figura 3.3- Alocação/Emissões Verificadas por Sector 2009 [43] .....	24
Figura 3.4-Preço EUA Abril 2009 .....	25
Figura 3.5 Preço EUA Abril 2010 .....	25
Figura 3.6-Alocações 2008/2009 [43] .....	26
Figura 3.7-Alocações Sector 1 2008/2009 [43] .....	27
Figura 3.8- Índice Produção Industrial Vs P EUA [44].....	28
Figura 3.9-Correlação Cruzada-Preço EUA com Índice de Produção Industrial .....	29
Figura 3.10-Índice de Produção Industrial Vs Preço de Petróleo .....	31

Figura 3.11-Petróleo Vs Preço EUA .....	32
Figura 3.12-Preço Petróleo vs Preço EUA (2010). ....	33
Figura 3.13-Correlação Cruzada- Preço EUA com Preço Petróleo .....	34
Figura 3.14-Preço EUA Vs Preço Electricidade .....	36
Figura 3.15-Preço EUA Vs Preço Electricidade 2010.....	37
Figura 3.16-Preço EUA Vs Euronext 100 .....	38
Figura 3.18-Correlação Cruzada. Preço EUA com Euronext 100 .....	39
Figura 3.17-Preço EUA Vs Euronext 100 2010.....	39
Figura 3.19-Autocorrelação da Série Preço EUA .....	40
Figura 3.20-Autocorrelação Parcial Série Preço EUA .....	41
Figura 4.1 -Modelo de Previsão para D+1 .....	44
Figura 4.2-Modelo de Previsão para D+2.....	45
Figura 4.3-Modelo de Previsão para D+3.....	46
Figura 4.4-Modelo de Previsão de Preços de Electricidade. ....	47
Figura 4.5-Intervalos de Dados Usados na Previsão.....	48
Figura 4.6-Preço EUA em 2010. ....	49
Figura 4.7-Amplitude do Conjunto de Treino.....	49
Figura 4.8-Exemplo de conjunto de treino para previsão para o dia seguinte. ....	49
Figura 4.9 -Real/Previsto-Previsão para D+1 .....	51
Figura 4.10- Real/Previsto-Previsão para D+2 .....	52
Figura 4.11-Real/Previsto-Previsão para D+3.....	52
4.12-Comparação de Modelos .....	54
Figura 6.1-Preço Gás Vs P EUA Vs P Ele.....	63
Figura 6. 2-Nordpool Vs P EUA.....	64





## Lista de Tabelas

Tabela 1.1-Países Anexo I .....	2
Tabela 1.2-Países ao abrigo do CELE. ....	5
Tabela 2.1-ERRO MAPE e MAE [21].....	12
Tabela3.1-Códigos associados a cada Actividade no CELE.....	23
Tabela 4.1-Erro MAPE .....	53



# Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AAU	<i>Assigned Amount Units</i>
ARCH	<i>AutoRegressive Conditional heteroskedasticity</i>
CDS	<i>Clean Dark Spread</i>
CELE	<i>Comércio Europeu de Licenças de Emissão</i>
CER	<i>Certified Emission Reduction</i>
COP	<i>Conference of Parties</i>
CSS	<i>Clean Spark Spread</i>
DA	<i>Deterministic Annealing</i>
EIT	<i>Economies in Transition</i>
ERU	<i>Emission Reduction Unit</i>
EUA	<i>European Union Allowance</i>
EU-ETS	<i>European Union Emission Trading Scheme</i>
GARCH	<i>Generalized AutoRegressive Conditional heteroskedasticity</i>
IC	<i>Implementação Conjunta</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
MDL	<i>Mecanismo de Desenvolvimento Limpo</i>
MLP	<i>Multi Layer Perceptron</i>
NAP	<i>National Allocation Plan</i>
RN	<i>Rede Neuronal</i>
TDNN	<i>Time Delay Neural Network</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>

## Lista de símbolos

$\hat{P}_{EUA(d+k,d)}$	<i>Previsão do Preço da EUA para o dia <math>d+k</math>, feita em <math>d</math>.</i>
$\hat{P}_{Ele(d+k,d)}$	<i>Previsão do Preço da Electricidade para o dia <math>d+k</math>, feita em <math>d</math>.</i>
$P_{EUA(d)}$	<i>Preço da EUA no dia <math>d</math>.</i>
$P_{Ele(d)}$	<i>Preço da Electricidade no dia <math>d</math>.</i>
$CO_2$	<i>Dióxido de Carbono</i>
€	<i>Unidade Monetária EURO</i>
\$	<i>Unidade Monetária Dólar</i>

# Capítulo 1

## Introdução

Esta dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Como resultado surge, neste trabalho, uma descrição de todo o processo de investigação inerente à criação de modelos de previsão de preços do Mercado de Carbono criado na Europa.

Os modelos desenvolvidos são dotados da capacidade de prever preços diários das licenças de emissão de CO<sub>2</sub>, em mercado spot, para um horizonte de três dias. Esses modelos são sujeitos aos métodos de avaliação propostos, de forma a demonstrar a robustez e eficácia desses modelos.

O objectivo principal deste capítulo é expor o contexto em que surge a necessidade de se criarem modelos de previsão de preços de carbono, sendo que é também neste capítulo que se faz uma sucinta descrição da organização da dissertação.

### 1.1 - Enquadramento

No fim da década de 80, eram já bastante discutidas as potenciais influências das emissões de gases poluentes no clima, de tal forma que em Novembro de 1990 a Assembleia-geral das Nações Unidas concordou em estabelecer um processo que serviria para negociar e adoptar uma convenção que estaria pronta para os países assinarem em 1992 na chamada Earth Summit realizada no Rio de Janeiro. Essa convenção, “ United Nations Framework Convention on Climate Change” (UNFCCC), foi aberta para assinaturas em 9 de Maio de 1992 e entrou em vigor em 21 de Março de 1994. Um dos princípios estabelecidos era o de que a UNFCCC dividia os países signatários no Anexo I, e “Não Pertencentes ao Anexo I” ( Non-Annex I). Sendo que os países industrializados, incluídos no chamado Anexo I, deveriam igualar os níveis de emissões de CO<sub>2</sub> de 2000 aos de 1990. A partir daqui começaram a realizar-se anualmente as chamadas Conferências das Partes, que serviriam para discutir formas de materializar os princípios acordados na UNFCCC.

## 2 Introdução

Em 1997, na cidade de Quioto, realizou-se a terceira Conferência das Partes, onde estiveram presentes 159 representantes das várias nações mundiais. Foi nesta conferência que se adoptou o famoso Protocolo de Quioto.

Durante as negociações, decidiu-se que, de acordo com os princípios estabelecidos na “United Nations Framework Convention on Climate Change” (UNFCCC), apenas seriam impostas limitações, nas emissões de gases de efeito de estufa, aos países desenvolvidos, ou seja aos países incluídos no chamado Anexo I da UNFCCC, incluindo os países cujas economias se consideravam em transição (EIT-Economies in Transition).

Neste caso os países do Anexo I, apresentar-se-iam como exemplo para os outros, sendo que os primeiros passos na redução dos gases de efeito de estufa deveriam ser dados por estes países. [1]

Tabela 1.1-Países Anexo I

Alemanha	Lituânia*
Áustria	Luxemburgo
Bielorrússia*	Mónaco
Bélgica	Holanda
Bulgária*	Nova Zelândia
Canadá	Noruega
Croácia*	Polónia*
República Checa*	Portugal
Dinamarca	Roménia
Estónia*	Federação Russa
Comunidade Europeia	Eslováquia*
Finlândia	Eslovénia*
França	Espanha
Austrália	Suécia
Grécia	Suíça
Hungria*	Turquia
Islândia	Ucrânia*
Irlanda	Reino Unido
Itália	Irlanda do Norte
Japão	EUA
Letónia*	
Liechtenstein	

\*Países EIT- Economias em Transição

### 1.1.1 - Redução das Emissões

No Protocolo de Quioto, ficou estabelecido que os países do Anexo I (que no âmbito do protocolo foram listados no Anexo B) estariam obrigados a reduzir as suas emissões de gases de efeito de estufa num mínimo de 5% abaixo dos níveis de 1990, no período de cumprimento de 2008 a 2012. Mais uma vez, cada país ficou com objectivos de redução de emissões de acordo com a sua situação económica.

Os níveis de redução de emissões dos países do anexo I estão listados como percentagens do ano de base: 1990 (excepto para os países EIT, que usam um ano mais recente). A União Europeia, no seu todo, fica obrigada a reduzir em 8 % as emissões de CO<sub>2</sub>; os Estados Unidos da América têm como meta uma redução de 7%; por sua vez países como a Austrália e a Islândia podem aumentar as suas emissões em 8% e 10 % respectivamente [3].

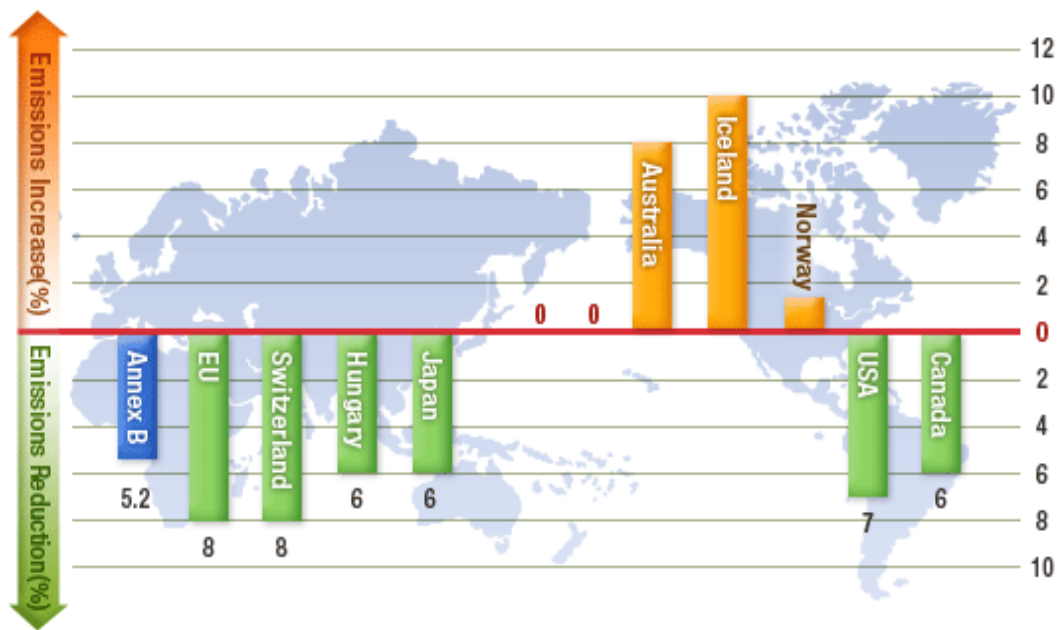


Figura 1.1 Metas para Emissões de CO2 [4]

### 1.1.2 - Mecanismos de Mercado

O protocolo de Quioto explorou novos territórios no âmbito do combate das alterações climáticas ao introduzir três mecanismos, chamados os Mecanismos de Mercado (Implementação Conjunta, Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e Comércio de Emissões), cujo objectivo era flexibilizar o cumprimento das obrigações, facilitando a troca de emissões através da criação de créditos negociáveis, tanto via mercado propriamente dito, como via projectos MDL ( em Inglês CDM-Clean Development Mechanism) e IC ( em Inglês JI-Joint Implementation) [6].

#### 1.1.2.a - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

O MDL é um mecanismo através do qual os países do Anexo I podem fazer investimentos em países não pertencentes ao Anexo I de forma a promover a mitigação de emissões de gases de efeito de estufa. Como retorno desses investimentos, os países do Anexo I podem receber as chamadas “Certified Emissions Reduction credits” (CER), como retribuição pela redução de emissões de um dos gases de efeito de estufa num país não pertencente ao Anexo 1. Por sua vez, as CERs podem ser utilizadas por um país desenvolvido como forma de cumprir as metas de redução dos gases de efeito de estufa.

Todo este processo é supervisionado pelo Quadro Executivo do MDL que regista e valida os projectos, atribui CERS e gere uma série de grupos de trabalho.

Uma disposição importante de todo este processo é que as CERs atribuídas no âmbito dum projecto MDL representem apenas as reduções acima daquelas que seriam obtidas na ausência de qualquer projecto.

Este mecanismo poder-se-á revelar interessante para os países promotores dos investimentos, já que em determinadas situações, poderá ser financeiramente mais vantajoso reduzir emissões em países em desenvolvimento.

### 1.1.2.b - Implementação Conjunta

De forma similar ao MDL, a Implementação Conjunta é um programa através do qual os países podem receber as “Emission Reduction Units” (ERUs) a partir de projectos de redução de emissões de gases de efeito de estufa, no entanto esses projectos são conduzidos em conjunto entre dois países pertencentes ao Anexo 1.

Tal como as CERs, as ERUs podem ser utilizadas pelos países participantes para efeitos de cumprimentos das metas estabelecidas no Protocolo de Quioto.

Projectos IC deverão acontecer, com muito mais probabilidade, nos países EIT, onde há geralmente mais oportunidades para reduzir emissões a custos mais baixos. Estes projectos terão que ter, obrigatoriamente, a aprovação de todos os países envolvidos nele e, tal como nos projectos MDL, terão que levar a uma redução de emissões de gases de efeito de estufa, superior à potencial redução que teria lugar se nenhum projecto fosse levado a cabo.

### 1.1.2.c - Comércio de Emissões

O comércio de emissões representa um dos três mecanismos contidos no Protocolo de Quioto e a sua introdução representa um passo relevante da política internacional de ambiente, visto que, pela primeira vez a um nível global sugere-se a utilização de um instrumento económico de política ambiental.

O comércio de emissões, é uma ferramenta que está apenas ao dispor dos países pertencentes ao Anexo I. Basicamente este mecanismo assenta nos seguintes princípios:

- É estabelecido um limite de emissões a cada país.
- Cada país, conforme os seus limites de emissão, atribui a cada empresa um número de licenças.
- Se um país não atingir os seus limites de emissão, pode vender as licenças excedentes.
- Se um país ultrapassar os seus limites, terá que adquirir as licenças, a outros países com excedente de licenças de emissão, de forma a igualar o que emitiu.

No âmbito do protocolo de Quioto, as licenças de emissão são denominadas “Assigned Amount Units”(AAUs).

Com o comércio de emissões, os países que, com facilidade, conseguem reduzir emissões, têm assim um incentivo maior para proceder a essa redução abaixo do nível requerido pelo protocolo de Quioto e vender os créditos a outros países cujos custos de redução de emissões sejam mais elevados. Desta maneira, tanto o vendedor como o comprador têm neste mecanismo uma ferramenta para diminuir custos de regulação, tendo em conta os lucros do vendedor e a poupança que o comprador faz.

Convém referir que o comércio de emissões pode ser realizado regionalmente, sendo que foi neste contexto que surgiu o CELE [7].

#### 1.1.2.c.1. Comércio Europeu de Licenças de Emissão

Como resposta ao Protocolo de Quioto, a União Europeia criou o CELE, como ferramenta de redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Basicamente o CELE é um sistema “cap-and-trade” através do qual os participantes compram e vendem as licenças de emissão, que no âmbito deste mercado são as EUAs (que correspondem a 1 tonelada de CO<sub>2</sub>), equivalendo às AAUs no protocolo de Quioto. De ter em conta que enquanto o Protocolo de Quioto propõe o Comércio

de Emissões a ser realizado entre países enquanto as negociações, no âmbito do CELE, são realizadas entre as empresas presentes no CELE.

O CELE, lançado em 2005, opera ao longo de períodos discretos, sendo que o primeiro período, também chamado o período de aprendizagem, durou até 2007. O segundo período que estamos a atravessar actualmente, vai de 2008-2012, sendo este o período no qual a União Europeia terá que reduzir em 8% as emissões de CO<sub>2</sub>.

Este sistema engloba, ao longo dos 29 países abrangidos por este mercado (ver tabela [1.2]), as principais fontes de CO<sub>2</sub> tais como as Centrais Térmicas, Refinarias, Metalúrgicas, Cimenteiras, fabrico de Cerâmica, de Vidro, Papel, assim como todas as restantes indústrias de combustão com uma potência térmica nominal superior a 20 MW.

Tabela 1.2-Países ao abrigo do CELE.

Áustria	Bélgica	França	Grécia
Malta	Holanda	Espanha	Suécia
Republica Checa	Dinamarca	Alemanha	Hungria
Polónia	Portugal	Reino Unido	Bulgária
Estónia	Finlândia	Itália	Irlanda
Roménia	Eslovénia	Liechtenstein	Noruega
Letónia	Lituânia	Luxemburgo	
Eslováquia	Chipre		

Todavia é preciso realçar que para além dos participantes com obrigações regulamentares perante o CELE, como os referidos acima, existem outros tipos de participantes no CELE: como os intermediários financeiros que funcionam como conselheiros, gestores de risco ou os “players” que apenas vêem o CELE como uma forma de ganhar dinheiro com as flutuações dos preços das EUAs, sendo que não têm qualquer obrigação regulamentar de entregar EUAs anualmente [8-9].

Apesar da meta global da União Europeia de 8 % de redução de emissões, cada país tem um limite específico e tendo em conta esse limite faz, de forma autónoma, no início de cada período de cumprimento, a alocação anual de EUAs pelos participantes com obrigações legais perante o CELE. A alocação pode ser feita sem custos para o participante ou por leilão.

É através dos chamados Planos de Alocação Nacional ( National Allocation Plan- NAP),elaborados por cada país, que cada participante conhece a quantidade de EUAs que lhe é atribuída anualmente. Mais propriamente, os Planos de Alocação Nacional são elaborados pelo Ministério do Ambiente de cada país, no caso de Portugal via Agência Portuguesa do Ambiente.

Por sua vez, é também disponibilizado um relatório anual com os resultados das emissões de cada participante no CELE. Para tal, cada participante é obrigado ir preenchendo, ao longo do ano, um relatório disponibilizado via Internet (em Portugal chama-se Registo Português de Licenças de Emissão), com dados como os índices de produção, tipo de produto produzido, para que a entidade responsável pela disponibilização dos relatórios anuais de emissões possa compilar toda a informação. A entidade responsável pela elaboração dos relatórios anuais de emissões é o ITL (International Transaction Log), gerido pelo secretariado da UNFCCC. No que concerne à fiscalização dos dados enviados por cada participante, esta é feita por entidades acreditadas, no caso português temos a DELOITTE.

Convém referir que os NAPs são elaborados antes do início de cada período de cumprimento e contêm os valores anuais das alocações para cada ano desse período. Se o

## 6 Introdução

resultado das emissões de um determinado participante for superior ao que lhe foi atribuído no NAP, e se por ventura ele não tiver comprado suficientes EUAs de forma a compensar as emissões de CO<sub>2</sub> em excesso, esse participante terá que pagar uma multa por cada tonelada de carbono que produziu a mais. Se por ventura, um participante tiver emitido menos CO<sub>2</sub> do que a quantidade atribuída no NAP, poderá vender o excedente aos participantes que poluíram mais. Na figura [1.2] podemos ver um extracto do segundo período de cumprimento do CELE, com a calendarização dos principais eventos.

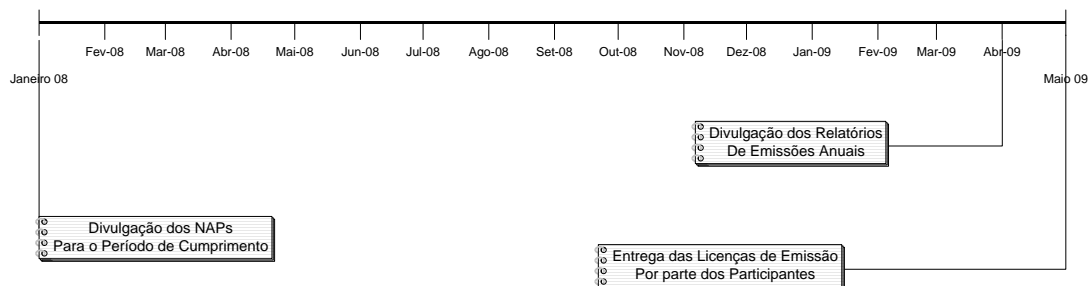


Figura 1.2-Calendarário CELE

## 1.2 - Motivação

No enquadramento percebe-se como funciona o mercado de carbono na Europa, como tal é possível inferir sobre a importância de um modelo de previsão de preços das EUAs.

De facto, para os participantes com obrigações regulamentares perante o CELE, as vantagens estratégicas que advêm duma previsão fiável, são de extrema importância, na medida em que permitem uma gestão muito mais eficaz dos recursos financeiros. Tendo em conta o horizonte de previsão dos modelos criados, esta ferramenta é também extremamente valiosa para os outros “players”, sem obrigações regulamentares, que negociam no mercado de carbono. Para estes, a capacidade de antever a variação diária do preço das EUAs, é o factor diferenciador na obtenção de maiores ou menores lucros. Mais ainda, permite também acrescentar valor ao serviço fornecido pelos Intermediários Financeiros que fazem a gestão do risco para quem negocia ao abrigo do CELE.

## 1.3 - Objectivos

No âmbito geral, a presente dissertação apresenta como objectivo principal a criação de modelos de previsão do preço em mercado spot das EUAs a curto e médio prazo. Entenda-se por curto prazo, um horizonte que se estenda de 1 a 7 dias e médio prazo de 7 dias a 1 mês. Esta dissertação pretende ser uma mais-valia na área da investigação, já que até ao momento ainda poucos autores abordaram o assunto, apesar do crescente interesse que o tema acarreta.

A criação dos modelos de previsão partiu dos seguintes requisitos:

- Estudo ao nível da selecção e tratamento de variáveis explicadoras.
- Construção dos modelos de previsão.

- Optimização dos modelos de previsão.
- Implementação de modelos de treino e teste.

## 1.4 - Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos.

O primeiro e presente capítulo é de carácter introdutório, onde se descrevem as principais premissas em que assenta o mercado de Carbono e se discute a importância de um modelo de previsão de preços de carbono.

O capítulo 2 é dedicado ao estado da arte relativo a modelos de previsão de “commodities” como são as EUAs. Sendo que são feitas sucintas descrições de modelos de previsão de preços: de SO<sub>2</sub> no mercado americano, Electricidade e Petróleo, também estes negociados em mercado numa forma similar ao carbono. São apresentados também resultados da pesquisa sobre modelização de preços das EUAs, e descrevem-se estudos já feitos sobre variáveis que influem no mercado de Carbono.

No capítulo 3 descreve-se o estudo das variáveis independentes relevantes que influem na variável dependente, o preço do carbono. Este estudo é da maior importância na construção de um modelo de previsão robusto e eficiente.

A descrição dos modelos de previsão finais é exibida no capítulo 4, são também apresentados os resultados destes perante os métodos de avaliação escolhidos para determinados conjuntos de teste.

O capítulo 5 apresenta as principais conclusões deste trabalho científico e indica algumas perspectivas para a sua continuidade futura.

## 1.5 - Informação Usada na Dissertação

### 1.5.1 - Fontes de Mercado

Os dados utilizados nesta dissertação, nomeadamente no estudo de influências no mercado de carbono e a posterior construção dos modelos de previsão, dizem respeito maioritariamente a mercados de “commodities” e acções, sendo que os dados recolhidos, deste tipo, são:

- Preço Spot das EUAs -Bluenext[44]
- Preço Spot da Electricidade na Alemanha; EXAA [45]
- Índice Euronext 100; [46]
- Preço Petróleo Brent [47]
- Preço Electricidade Nordpool [48]
- Gás Natural-PowerNext [49]

### 1.5.2 - Fontes Estatísticas

Os dados estatísticos usados dizem respeito a estimativas feitas pelo Eurostat [50] sobre o índice de produção Industrial das principais indústrias da União Europeia presentes no CELE

- Índice Produção Industrial Cimenteiras

## 8 Introdução

- Índice Produção Industrial Papel
- Índice Produção Industrial Vidro
- Índice Produção Industrial Cerâmica
- Índice Produção Industrial Metalúrgicas
- Índice Produção Industrial Refinarias

Tendo em conta a dimensão do mercado de Carbono, nomeadamente ao nível dos países envolvidos, assim como todo tipo de indústrias que negociam no CELE, esta tarefa de investigação das influências do mercado de carbono é dificultada dado que existe uma elevada escassez de informação a vários níveis. De facto, como mais à frente se vai descrever, para que os modelos criados sejam eficazes é necessária a previsão de preços de Electricidade na Alemanha, o que por sua vez implica o conhecimento de vários dados meteorológicos, de consumos energéticos, etc. Dados esses aos quais não se consegue aceder. Como tal, a hipótese que se apresentou como mais plausível, foi testar o modelo com valores passados, introduzindo um erro aleatório nos preços de electricidade que implicavam previsão.

Mais ainda, convém referir que apesar da selecção e estudo das variáveis independentes terem como ponto de partida conclusões já tiradas noutras investigações, e de se terem mostrado suficientes para a criação dos modelos de previsão, outros testes que se mostravam importantes ficaram impossibilitados de ser feitos por não se conseguir aceder a informação necessária, por esta ser comercializável:

- Testar influência dos preços de electricidade de alguns países com importância no seio da União Europeia: França, Reino Unido, Itália.
- Acesso a valores de Clean Dark Spread(CDS), Clean Spark Spread(CSS), na União Europeia. O CDS representa a diferença entre o preço de electricidade e a soma do preço do carvão e preço de licença de emissão. O CSS representa a diferença entre o preço de electricidade menos a soma do preço do gás e preço de licença de emissão. De uma forma simplista pode-se considerar o CDS e o CSS representam o lucro de um central térmica que use como combustível o carvão ou gás natural, respectivamente.

# Capítulo 2

## Estado da arte

### 2.1 - Introdução

O CELE foi a ferramenta proposto pela União Europeia de forma a cumprir com os limites de emissão de gases de efeito de estufa, impostos pelo Protocolo de Quioto. Como se sabe esse mecanismo permite às indústrias que mais poluem, uma forma de negociarem a compra e venda de licenças de emissão dentro da Comunidade Europeia, de maneira a que se proceda a uma redução efectiva de emissão de gases poluentes de uma forma economicamente eficiente.

Para todos os que participam no CELE, é extremamente importante uma ferramenta que permita uma correcta previsão dos preços das licenças de emissão, para que se proceda a uma gestão eficiente de recursos financeiros.

Este capítulo é dedicado à exposição de estudos, já existentes, que incidem sobre mecanismos de previsão do preço das EUAs, e variáveis que influenciam o comportamento destas licenças. Todavia em primeiro lugar, far-se-á uma breve referência a previsão de preços de petróleo e electricidade, sendo estes “commodities” negociadas de forma similar ao carbono. Por fim, são feitas considerações sobre a ferramenta utilizada, as Redes Neurais, aquando da investigação inerente a esta dissertação.

## 2.2 - Previsão de Preços de Petróleo

É conhecida a dificuldade em prever preços de petróleo. Isto acontece devido à grande volatilidade da série de preços de petróleo. De facto, está demonstrado que os métodos, baseados em modelos econométricos, como em [14][16][17], são uma ferramenta ineficaz na previsão de preços de petróleo, quando aplicadas continuamente. Ou seja, como estas metodologias não captam as características não-lineares dos preços do petróleo, rapidamente se tornam obsoletas [13].

Como resposta têm aparecido metodologias de previsão do preço do petróleo, baseado em estratégias computacionais.

Em [15], surge uma metodologia baseada em redes neuronais, que utiliza técnicas de decomposição de forma a dividir a série temporal de entrada num conjunto de funções, que por sua vez funcionarão como entrada da rede neuronal. Como saída obtemos os resultados da previsão.

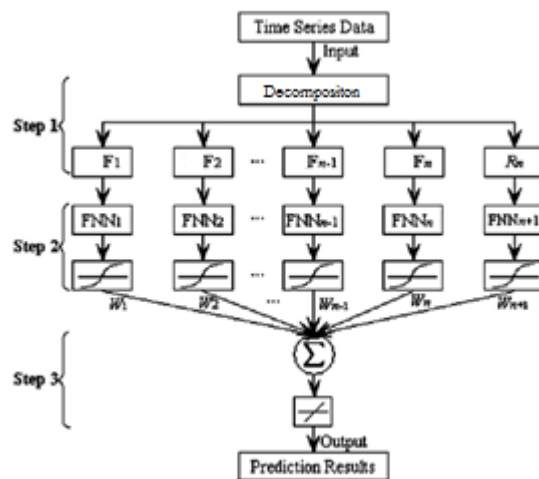


Figura 2.1-Modelo de Previsão de Preços de Petróleo [15]

Em [18], são criados e comparados modelos de previsão com base em redes neuronais e programação genética, cujos resultados comparativamente com o valor real são apresentados de seguida:

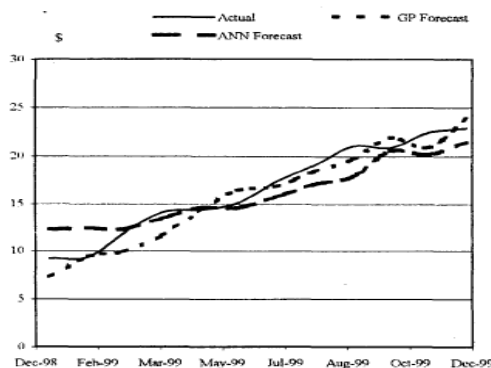


Figura 2.2-Resultados do Modelo de Previsão [18]

## 2.3 - Previsão de Preços de Electricidade

No decorrer da investigação inerente a esta dissertação, concluiu-se a necessidade de prever preços futuros no mercado spot de electricidade, nomeadamente para os sete dias seguintes.

Há já um grande número de estudos relativos a esse tema, de forma que esta secção se concentra na exposição de alguns dos artigos disponíveis, nomeadamente os que se apresentam de mais fácil interpretação e mais adequados ao horizonte de previsão pretendido.

Em [19], propõe-se uma metodologia baseada em redes neuronais com o objectivo de prever preços de electricidade para a semana seguinte.

Neste artigo, apresentam-se como determinantes, na dinâmica dos preços, algumas características como: históricos de preços, consumos energéticos, estratégias de licitação nos mercados, reservas de operação, clima e importações de energia.

É também tida em conta a sazonalidade dos preços, nomeadamente ciclos diários e semanais. Sendo que os perfis diários dos preços são classificados como “dias úteis”, “Sábados” e “Domingos”. Para além disso são tidos em consideração os períodos de férias, que por sua vez também exercem forte influência na variação do consumo energético.

De realçar os bons resultados obtidos nos testes do modelo, sendo que os erros médios obtidos no mercado Espanhol rondam os 9% e no mercado Californiano rondam os 3%.

Também em [20] é proposto uma rede neuronal para uma previsão horária do preço de electricidade, neste caso para um horizonte máximo de três dias.

Os pressupostos em que assenta este estudo são muito parecidos com os de [19]. Sendo que se dá ênfase à sazonalidade, criando-se as variáveis: “Week day” e “Month”. Todavia este modelo aborda, de forma diferente, as outras influências como o clima e avarias no Sistema Eléctrico. Sendo que tendo em conta a dificuldade inerente à avaliação numérica destas influências são criadas três redes neuronais para cada previsão, onde se simulam os valores “maximum”, “medium” e “minimum” esperados para os preços num dia.

De salientar, mais uma vez, o baixo erro obtido para as três previsões, sendo que este é menor que 0,5 c.€ .

Um estudo interessante diz respeito a [21], onde se faz uma previsão de preços de electricidade num horizonte de 7 dias. Mais uma vez são utilizadas Redes Neuronais, como ferramenta de previsão.

O mais marcante neste estudo diz respeito às variáveis de entrada utilizadas. Sendo que para além das já conhecidas: Consumo e variáveis referentes à sazonalidade: Horas, Dia da Semana e Mês; é feita também a desagregação do Sistema Eléctrico de Energia nas suas formas diversas de produção de energia eléctrica, nomeadamente: Produção Via Centrais de Carvão, Produção Via Centrais de Ciclo Combinado, Produção em Barragens de Albufeira, Produção em Barragens Fio-de-água, Produção em Regime Especial Térmica, Produção Em Regime Especial Eólica, Produção em Regime Especial Hídrica e Produção em Regime Especial Fotovoltaica. É também considerada a potência total instalada em Regime Especial.

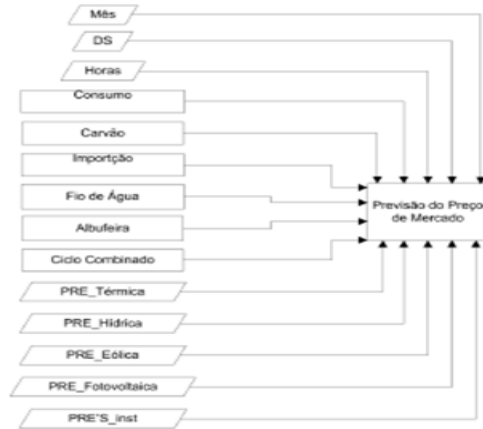


Figura 2.3-Estrutura Modelo Previsão [21].

Abaixo apresenta-se um gráfico (figura [2.4]), com um dos testes feito nessa dissertação, para a primeira semana de Outubro de 2009, dos preços de electricidade negociados no Mibel.

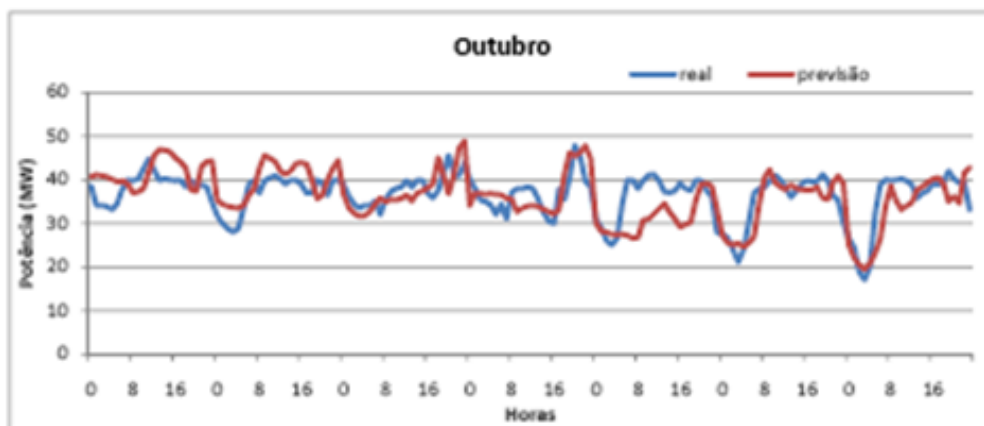


Figura 2.4-Resultados Previsão Horária Electricidade [21].

Como se pode observar, os resultados obtidos são satisfatórios. Abaixo estão os erros MAPE e MAE para todos os testes realizados:

Tabela 2.1-ERRO MAPE e MAE [21]

	Erro 7 dias	
	MAPE	MAE
Março	13,75%	5,27
Junho	6,51%	2,49
Outubro	10,75%	3,93
Dezembro	19,29%	6,35

Algumas das principais conclusões que se tiram da leitura da dissertação [21], é que os preços de electricidade são muito influenciados não só pelo consumo, mas também pela percentagem de produção de energia eléctrica via energias renováveis. Sendo que o preço

baixa com maior percentagem de energias renováveis e sobe com menor percentagem de produção via energias renováveis.

## 2.4 - Variáveis Explicadoras do Preço das EUAs

Como ponto de partida para qualquer modelo de previsão é preciso fazer um estudo intensivo sobre quais os factores que fazem variar a variável dependente em questão.

Há já alguma investigação publicada no que concerne a este tema. Todavia, estando nós a meio do segundo período do CELE é natural que os estudos existentes, sobre influências no preço das EUAs, se concentrem mais no primeiro período, que teve o seu início em 2005 e terminou em 2007.

Optou-se por se dividir em duas partes (1º e 2º períodos de cumprimento) a exposição dos estudos que pareceram mais relevantes para esta dissertação. Tal divisão foi feita, tendo em conta as divergências que ocorrem nas duas fases, não só no que diz respeito às variáveis que influem na variação dos preços em mercado de carbono, mas também porque os limites de emissão de CO<sub>2</sub> são mais rigorosos no segundo período do CELE. É preciso também ter em conta que não é permitido o chamado “banking” de licenças de emissão entre o período 1 e 2. Ou seja, não se podem armazenar EUAs compradas na fase I do CELE, de forma a cumprir com os objectivos do período 2, logo há uma desconexão entre as duas fases que justifica o estudo separado destas.

### 2.4.1 - Variáveis Explicadoras do Preço das EUAs-1ºPeríodo

Observando o gráfico abaixo, facilmente se conclui que na primeira fase do CELE, é bastante visível a grande volatilidade dos preços spot da EUA [22].



Figura 2.5-Preço EUA Spot 1ºPeríodo [23]

Os estudos mais conhecidos sobre a evolução dos preços das EUAs e suas influências, estão em consonância nas conclusões mais relevantes, sendo que as principais influências verificadas e comuns à maior parte das investigações feitas no âmbito deste tema são:

- Preços de Electricidade;
- Preços de Combustíveis Fósseis;
- Clima;
- Relatórios de Emissões Verificadas;

Em [24] para além das conclusões acima, verificou-se que:

- As quedas abruptas dos preços verificadas em Abril de 2006 (ou seja, quando foi lançado o Relatório das Emissões verificadas em 2005), assim como em Outubro de 2006, sugerem que o comércio de licenças de emissão era feito com estimações de má qualidade, da quantidade de emissões libertadas até ao momento.
- Quando o limite de emissões não é estabelecido abaixo do normalmente verificado, o comércio de emissões não consegue garantir um preço das EUAs suficientemente alto para incentivar à redução das emissões de CO<sub>2</sub>.
- Existe a possibilidade dos preços das EUAs não terem sido definidos pelo conjunto total de participantes num mercado eficiente, mas sim por um conjunto de participantes dominantes, que por sua vez condicionaram os preços de forma a maximizarem lucros. Neste caso, os participantes com mais capacidade para exercer poder de mercado são as grandes centrais térmicas de produção de energia eléctrica.

De facto, esta última conclusão, é partilhada em [25], que expõe graficamente a diferença entre a proporção de licenças de emissão atribuídas a cada sector, sendo que em 2006, 70% dessas licenças foram atribuídas ao sector da combustão (que inclui centrais térmicas). Por sua vez em [26] pode-se verificar que quase 30% do total de licenças atribuídas também em 2006, foram atribuídas ao sector da combustão na Alemanha.

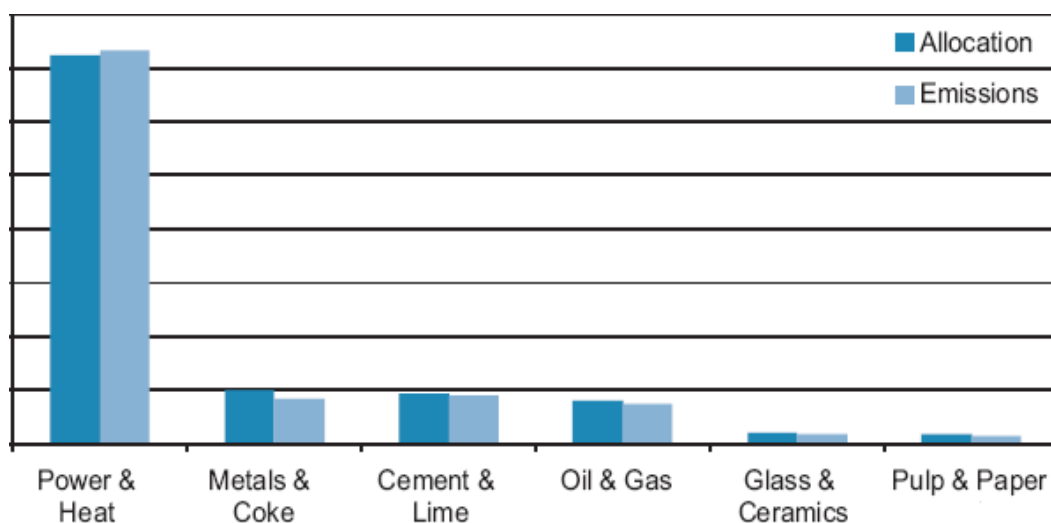


Figura 2.6-EUAs Alocadas por Indústria [25].

Nesse artigo [26] estuda-se e conclui-se a influência dos índices de produção industrial, nos nove sectores com obrigações regulamentares perante o CELE, nos preços spot das EUAs.

Em [27], as mais relevantes conclusões dizem respeito ao facto de se identificar os preços do Petróleo (Brent) como principal influência nos preços dos restantes combustíveis fósseis, que por sua vez influenciam os preços da electricidade e que estes, por fim, afectam os preços de carbono.

Outras influências do preço do CO<sub>2</sub> que foram apontados como relevantes dizem respeito ao dark e spark spreads, que por sua vez representam o lucro obtido pela venda duma unidade de electricidade quando se utiliza carvão e gás natural, respectivamente.

Com a introdução dos custos associados ao carbono, o dark e spark spreads começaram a ser denominados de clean dark e clean spark spread. Tendo em conta que a produção de electricidade, via carvão, é mais poluente, se o clean dark spread for superior ao clean spark spread, é de esperar um aumento da procura de EUAs e consequente subida do preço destas [28].

Finalmente em [29], em relação à influência das condições atmosféricas, tendo em conta que estas influenciam o consumo energético, assim como a percentagem de energias renováveis na produção de electricidade, terão possivelmente influência nos preços no mercado de carbono.

A partir deste estudo foi possível concluir que apenas valores, das variáveis referidas nos estudos acima, captados na Alemanha, produzem significantes alterações no preço das EUAs.

#### 2.4.2 - Variáveis Explicadoras do Preço das EUAs-2º Período

Tendo em conta que estamos ainda a meio do segundo período do CELE, os estudos sobre as variáveis independentes que influem no preço do carbono são praticamente inexistentes. De facto a pesquisa que foi feita, no sentido de apurar o estado de arte sobre este tema no período 2, permitiu apenas encontrar [28] como investigação relevante. Todavia, os resultados desse estudo são da maior importância e serviram de ponto de partida para a investigação inerente a esta dissertação.

Neste artigo estuda-se o impacto das principais variáveis independentes no período 2 que foram também verificadas no período 1, exceptuando a bolsa de acções que neste caso é representada pelo Índice Eurostoxx 600.

Segundo essa investigação, os mercados spot estão a ganhar cada vez mais importância, sendo que em 2008 houve 250 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> negociadas no mercado BlueNext. Convém referir que o BlueNext é neste momento o mercado spot mais importante a negociar no CELE [30].

A conclusão mais relevante que se tirou de [28] é que os preços de contractos de futuros electricidade, que são determinados em grande parte pelos preços spot de electricidade, são o principal “driver” de preços futuros de carbono que por sua vez influenciam os preços spot do mercado de carbono. Todavia, é dito que devido à crescente importância do mercado spot que se verificou em 2008, este começa a tornar-se cada vez mais independente do mercado de futuros.

No esquema abaixo, podemos ver como se relacionam as várias variáveis entre si no segundo período, nomeadamente procura-se identificar como se estabelecem as relações de dependência entre elas.

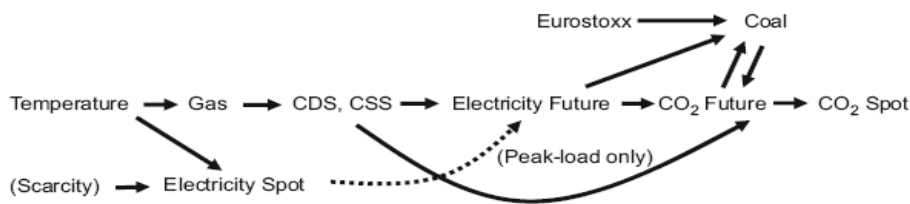


Figura2.7-Interdependência entre variáveis explicadoras do PEUA no 2º Período do CELE [28]

De notar que em [28], os testes realizados permitiram concluir que a influência que os combustíveis fósseis têm no preço spot das EUAs é “surpreendentemente, mas estatisticamente comprovado que é baixa”.

Mais ainda, variáveis como temperatura, Clean Dark Spread e Clean Spark Spread, segundo os testes de causalidade feitos têm menos influência, agora no segundo período, nos preços de carbono do que no primeiro período.

## 2.5 - Modelagem da dinâmica do Preço EUA

A comercialização de licenças de emissão começou nos Estados Unidos, com o mercado de  $SO_2$ . Desde então que se tenta estudar o comportamento dos preços das licenças de emissão, de forma a tentar prever as flutuações destes e, como tal, a minimização dos riscos, inerentes à participação nestes mercados. No caso particular do mercado de  $SO_2$ , estudos como [11] e [12] inferem principalmente sobre a influência de consumo eléctrico e evolução tecnológica nos preços das licenças de emissão de  $SO_2$ .

### 2.5.1 - Modelos Econométricos

#### 2.5.1.a - Modelos Arch/Garch

No que diz respeito á negociação de EUAs ao abrigo do CELE, já existem algumas publicações sobre a modelagem da dinâmica dos preços de licenças de emissão.

Em [31], são usados modelos econométricos com o objectivo de permitirem previsão a curto prazo. São sugeridos três modelos que permitam a assimilação de propriedades como a heterocedasticidade. Os modelos utilizados são modelos ARCH (Autoregressive Conditional Heteroscedasticity), GARCH (Generalized Autoregressive Conditional Heteroscedasticity) e Modelos de Mudança de Regime. Sendo que, enquanto os dois primeiros assumem um único processo estocástico, o ultimo modelo divide o comportamento estocástico da série temporal em várias fases com diferentes comportamentos estocásticos associados.

O modelo ARCH costuma ser utilizado para modelizar o comportamento dos rendimentos dos activos financeiros, que se baseia na existência de heterocedasticidade (variância flutuante ao longo do tempo) [32]. O modelo GARCH é, por sua vez, um modelo mais abrangente, no qual a variância depende não só do passado do resíduo da variável em causa, como também da variância do resíduo [33]. Quer o modelo ARCH quer o modelo GARCH são processos estocásticos em que a volatilidade condiciona os desempenhos no futuro próximo.

### 2.5.1.b - Modelos baseados em movimentos Brownianos

Em [35], o objectivo é também a construção de modelos econométricos que simulem o funcionamento do mercado de carbono. Por sua vez, estes modelos são utilizados para prever preços dos derivados das EUAs, para que se consiga realizar “hedging” de forma o mais eficiente possível.

Neste estudo calibraram-se os preços das EUAs referindo-se a modelos hiperbólicos e com base em Movimentos Brownianos.

Depois de feitas as calibrações, podem atribuir o preço aos contractos de opções, utilizando métodos de Monte Carlo.

Assentando nos mesmos princípios de modelagem, em [36] e [37], apresentam-se um estudo da dinâmica dos preços das EUAs e derivados, nos vários mercados: spot e futuros. Para tal é apresentado um modelo baseado em processos estocásticos, que recorre a equações diferenciais parciais para modelar a volatilidade e incertezas associadas ao comportamento dos preços das licenças em mercado de carbono.

### 2.5.2 - Modelos Híbridos

Em [34], é proposto um sistema híbrido que recorre a um conjunto de ferramentas como Deterministic Annealing e a Redes Neurais, funcionando assim como um modelo de previsão a curto prazo de preços em mercado de carbono.

A metodologia Deterministic Annealing (DA), como ferramenta de agrupamento, permite resultados bastante bons no processo de agrupamento das variáveis de entrada do sistema (conhecido por “clustering”) [38]. As redes neurais, por sua vez, são muito úteis no processo de previsão, do dia seguinte, do preço em mercado de carbono, sendo que os tipos de redes utilizadas neste sistema híbrido são Multi Layer Perceptron (MLP) que são construídas para cada “cluster”.

A opção de agrupar informação de entrada serve para ultrapassar a barreira da volatilidade dos preços das licenças, assim como para facilitar o processo de treino da rede neuronal.

Neste modelo, como método de selecção de variáveis de entrada utiliza-se modelagem gráfica (GM), para que se consigam obter relações mais realistas entre variáveis dependentes e independentes no modelo de previsão.

Abaixo pode-se ver o esquema deste modelo de previsão:

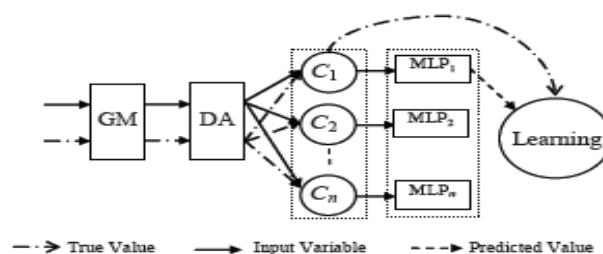


Figura 2.8-Modelo Híbrido de previsão do PEUA [34].

## 2.6 - Redes Neurais aplicadas às técnicas de previsão

Está já, neste momento, bastante difundida a aplicabilidade das Redes Neurais ao nível das técnicas de previsão [40].

Tendo em conta as suas características, esta é uma ferramenta que é considerada muito valiosa e atractiva na área da previsão. As Redes Neurais têm a capacidade de aprender com exemplos e captar as relações entre as várias variáveis em jogo, mesmo que essas relações sejam desconhecidas, ou seja, têm aplicabilidade em problemas onde a informação existente diz apenas respeito a observações feitas.

Desta maneira, as Redes Neurais são consideradas como um método estatístico multi-variável e não linear. Para além disso são uma ferramenta com a capacidade de generalizar, ou seja, aprendendo com uma parte da informação disponível, podem inferir correctamente sobre as relações entre a outra parte da informação que não é vista pela rede. Mais ainda, já foi provado que uma rede consegue aproximar qualquer função contínua, com mais precisão que as formas mais tradicionais [41].

### 2.6.1 - Estrutura das Redes Neurais

O princípio das Redes Neurais vai buscar a sua inspiração ao funcionamento do cérebro. Sendo que os neurónios são a unidade básica do sistema nervoso, que por sua vez comunicam entre si, recebendo a informação e transformando-a numa resposta.

Numa Rede Neuronal artificial, existem também unidades básicas, neurónios, que estão ligados entre si, sendo que a cada ligação é atribuída um peso. A estrutura final de uma rede neuronal é constituída por um conjunto de entrada, camadas de neurónios (camadas ocultas) e um conjunto de saída. Abaixo, pode-se ver um exemplo de uma Rede Neuronal:

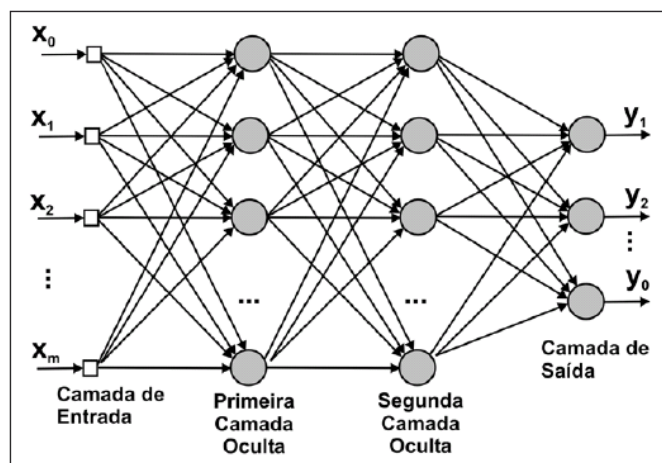


Figura 2.9-Rede Multilayer FeedForward [42].

### 2.6.2 - Funcionamento de um Neurónio

O funcionamento de um neurónio resume-se aos dois seguintes passos:

- Recebe as entradas  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  em  $n$  sinapses.

- Apresenta o sinal de saída  $f(x_1 + x_2 + \dots + x_n + b)$  em que  $f$  é a função de transferência e a constante  $b$  representa um desvio (bias).

Relativamente à função de transferência do neurónio, pode ser linear ou não linear, sendo estas últimas as mais utilizadas, já que normalmente pretende-se emular funções não lineares.

As funções mais empregues, são: em degrau, linear e a sigmóide.

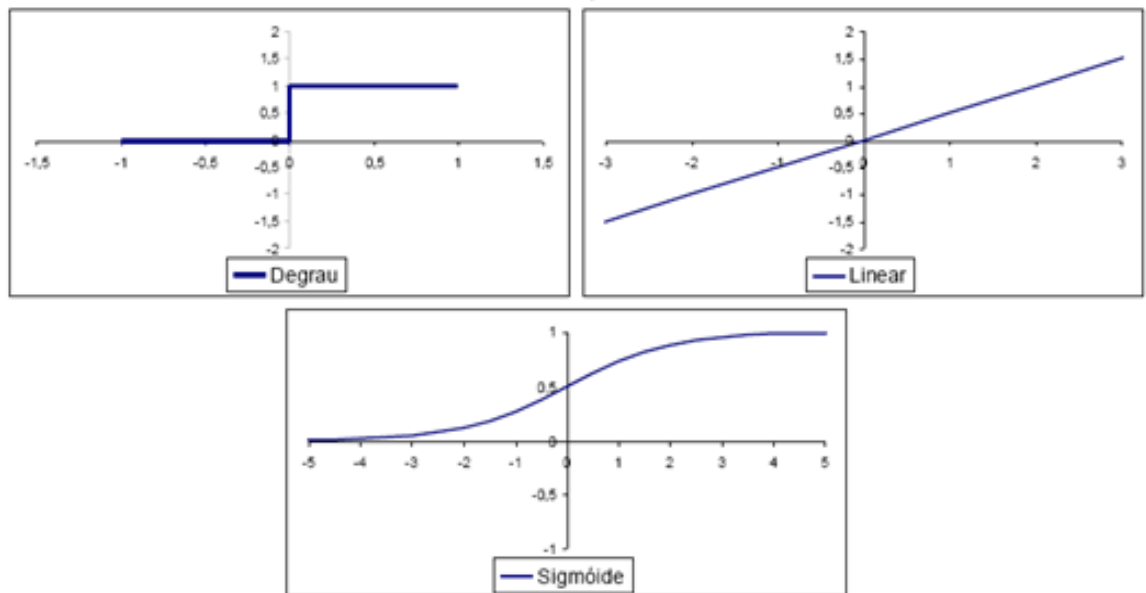


Figura 2.10-Funções de Transferência [51]

Destas três funções destaca-se a sigmóide, sendo esta a função que se irá utilizar neste trabalho.

### 2.6.3 - Arquitectura das Redes Neurais

As Redes Neurais são classificadas como unidireccionais (feedforward) ou recorrentes (feed-back).

O tipo mais utilizado é o feedforward que funciona de uma forma progressiva sem informação adicional acerca dos processos a jusante, ou seja, sem realimentação. Devido à sua representação em camadas são designadas por redes de camadas, sendo as Multi Layer Perceptron (MLP) um exemplo deste tipo de redes.

As redes feedback têm conexões entre neurónios no sentido contrário, ou seja, com realimentação, como as Time Delay Neural Network (TDNN).

### 2.6.4 - Aprendizagem das Redes Neurais

Designa-se por treino ao processo de descoberta pesos da função de transferência, que relacionam as variáveis de entrada com a variável de saída através da minimização do erro quadrático entre o sinal produzido pela rede e o sinal pretendido, o alvo.

No entanto, existem diferentes tipos de algoritmos de treino:

- Aprendizagem supervisionada - a rede aprende com informação dos sinais de entrada ou de saída, dentro deste tipo de aprendizagem existe:
  - Aprendizagem por retro-propagação - fundamenta-se num algoritmo que insere o método dos mínimos quadrados para minimizar o erro da previsão da rede neuronal; implementando assim um sistema sucessivos de calculo das derivadas parciais numa direcção inversa a normal propagação da informação da rede.
  - Aprendizagem pelo método do perceptrão - neste caso a função transferência não e diferenciável, sendo assim feita por funções discretas.
- Aprendizagem não supervisionada - a rede baseia-se unicamente no sinal de entrada e em esquemas que ajudam a compreender a saída.
- Aprendizagem forçada - a rede não conhece os valores de saída, contudo são atribuídas penalizações ou benefícios de acordo com o resultado pretendido.

# Capítulo 3

## Análise de Variáveis

### 3.1 - Introdução

Neste capítulo dar-se-á atenção à análise de informação necessária para a construção do modelo de previsão, sendo de extrema importância o conhecimento dos factores e variáveis que influenciam o preço das EUAs ( $P_{EUA}$ ).

No processo de desenvolvimento de um modelo de previsão é necessário ter em conta aspectos relacionados com a triagem da informação disponível e o pré-processamento dessa mesma informação, de tal maneira que o produto final seja um modelo robusto que recorra a variáveis independentes que sejam relevantes e não apresentem co-linearidade entre si.

Características como a fiabilidade dos dados recolhidos, correcta avaliação do impacto da variação de uma das variáveis no preço das EUA, assim como a observação dos instantes em que se verifica o impacto dessa mesma variação, são determinantes no sucesso do modelo de previsão.

Inerente ao processo de pesquisa de variáveis que possam influir na variação do preço das EUA existe também a preocupação em provar essas mesmas influências das variáveis e também em verificar a consistência daquelas ao longo do tempo.

Esta fase é a mais importante para a compreensão do problema e a finalização do mesmo.

Em primeiro lugar estudar-se-á o impacto da conjugação entre NAPs e Relatórios de Emissões nos preços das licenças de emissão, de seguida mostrar-se-á a relação entre Preço das EUAs com Preço de Electricidade, Preço de Petróleo, Índice de Produção Industrial e Euronext 100. O estudo foi feito com dados relativos a 2008, 2009 e primeiro semestre de 2010, todavia aquando da construção dos modelos de previsão ficou patente que só para 2010 é que era possível prever o preço das licenças de emissão de uma forma eficaz. No presente capítulo mostrar-se-á a diferença do comportamento das várias variáveis ao longo destes três anos, para que sejam perceptíveis os motivos pelos quais somente é possível uma previsão fiável em 2010.

## 3.2 - Planos de Alocação Nacional

Como já foi referido no capítulo 1, os Planos de Alocação Nacional dizem respeito à distribuição anual de EUAs que cada país faz pelas empresas presentes no seu território e que estão ao abrigo do CELE. Têm então uma função importantíssima na determinação prévia de variáveis susceptíveis de influenciar o preço do carbono. A partir do estudo dos NAPs de todos os países que negociam no CELE podemos recolher informação como as actividades e países aos quais é atribuído um número maior de licenças de emissão. De facto, estes dados conjugados com os relatórios de emissões anuais permitem a concentração do estudo nas actividades e países com mais capacidade para exercerem poder de mercado. Os relatórios anuais de emissões verificadas podem ser encontrados acedendo ao Community Independent Transaction Log (CITL) que, entre outras actividades, regista a atribuição, transferência e cancelamento de EUAs.[43]

### 3.2.1 - Alocação e Emissões Verificadas-2008/2009

Observando a figura [3.1] podemos ver a comparação entre a percentagem de licenças alocadas e as emissões verificadas em 2008 e 2009. De referir que não se faz o estudo relativo ao ano de 2010 visto que só em 2011 é que é lançado o Relatório de Emissões de 2010.

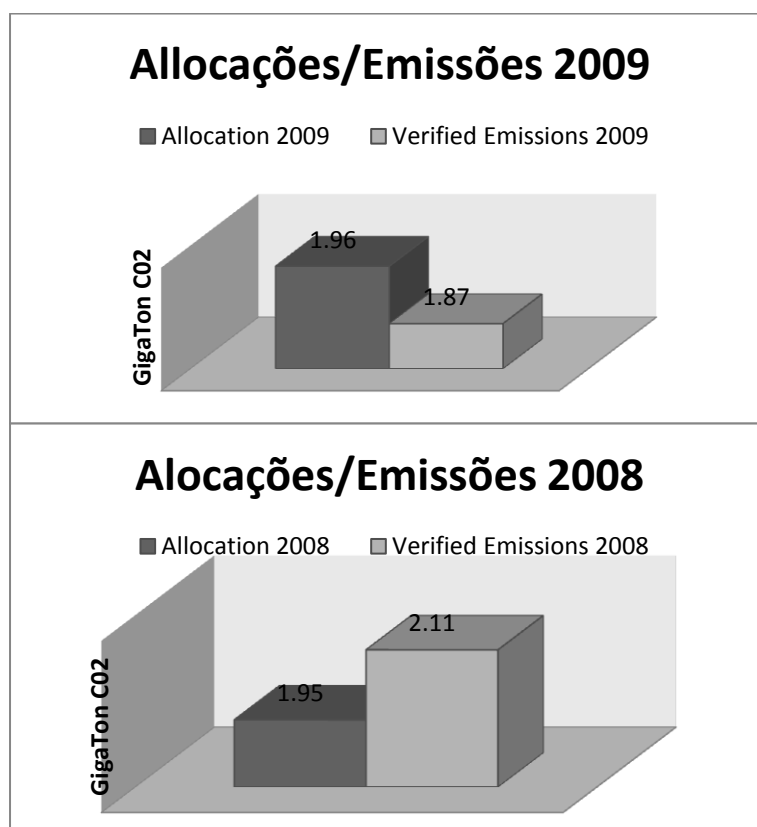


Figura3.1-Alocação de EUAs e Emissões verificadas 2008/2009[43]

Observando o gráfico correspondente a 2008 constata-se excesso de emissões comparativamente com as licenças de emissão alocadas, permitindo confirmar os limites de emissão mais rígidos comparativamente ao período 1. Na figura [3.2], que diz respeito também a 2008, pode-se observar a percentagem de EUAs alocadas e emissões verificadas por actividade. Convém recordar a atribuição do código, agora de forma mais pormenorizada, a cada actividade abrangida pelo CELE (ver tabela [3.1]).

Tabela3.1-Códigos associados a cada Actividade no CELE

Actividade	Código
Combustão com potência de entrada > 20MW	1
Refinarias	2
Fornos Coque	3
Tratamento do minério de metal	4
Siderurgias	5
Cimenteiras	6
Vidro	7
Cerâmica	8
Papel	9
Outras	10

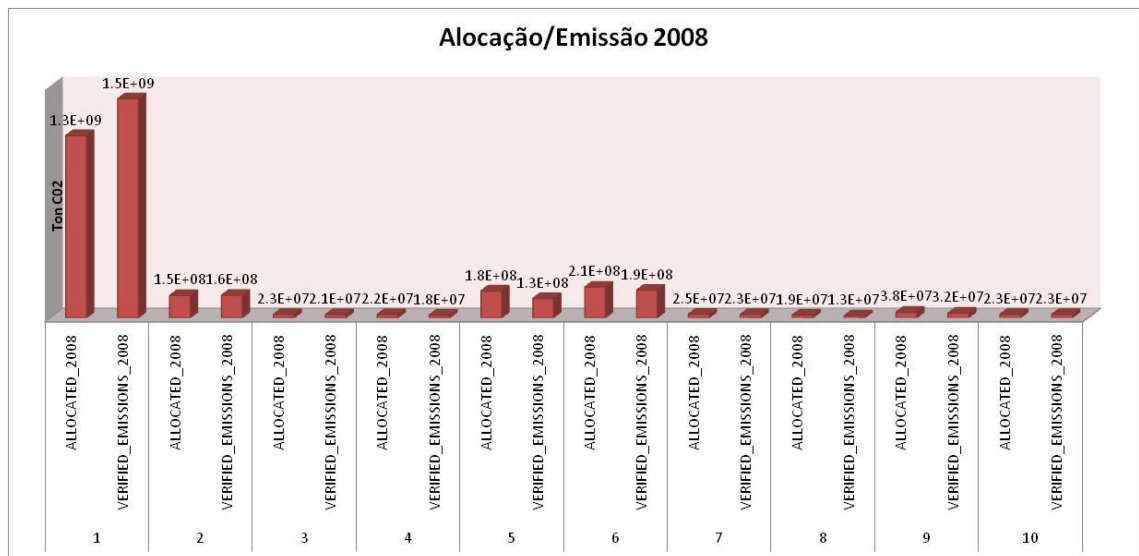


Figura 3.2-Alocação/Emissões Verificadas por Sector 2008 [43]

Como já tinha acontecido no primeiro período, agora também o sector 1 ( que inclui as centrais térmicas) é o que mais EUAs recebe, cerca de 64% de EUAs alocadas, que por sua vez conferem uma grande influência deste sector na variação dos preços do carbono. De facto, este sector foi o grande responsável pelo excesso de emissões comparativamente com a quantidade de EUAs atribuídas, logo é o mais interessado em comprar e, por sua vez, controlar os preços das licenças.

Em 2009, as emissões verificadas estiveram muito abaixo dos valores de 2008, o que é perfeitamente plausível, tendo em conta que foi neste ano que a crise económica foi mais

preponderante, reflectindo-se isso nos índices de produção industrial. Na figura [3.4] estão representados os dados relativos às actividades abrangidas pelo CELE:

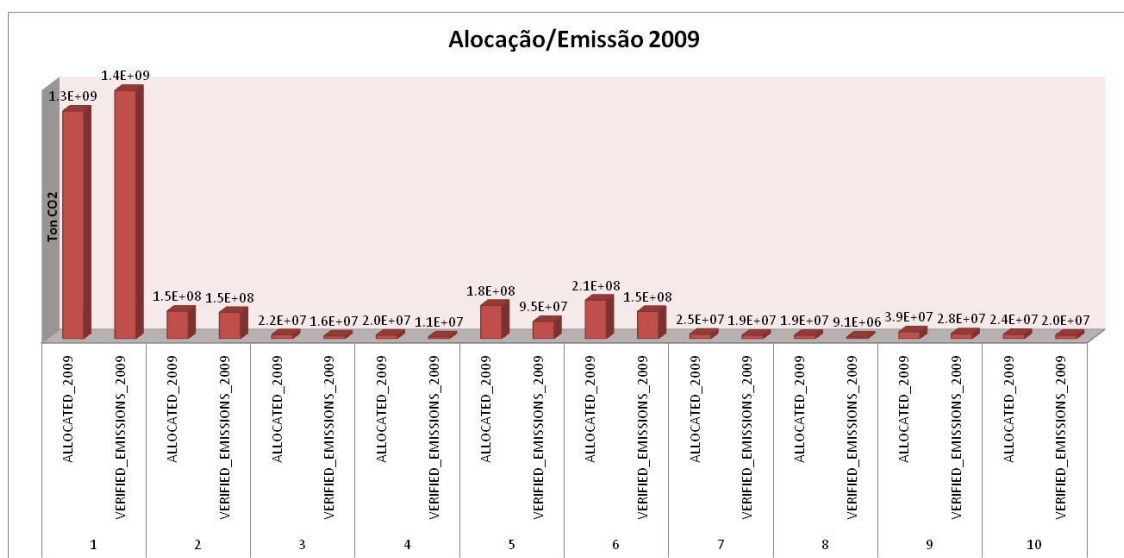


Figura 3.3- Alocação/Emissões Verificadas por Sector 2009 [43]

Convém referir que em 2009 o único sector a ultrapassar o limite das EUAs alocadas foi o sector 1.

### 3.2.2 - Influência dos Planos de Alocação Nacional no Preço das EUAs

Vejamos agora o impacto que os resultados das emissões verificadas em 2008 e 2009 tiveram no preço spot das EUAs. De lembrar que os relatórios de emissões verificadas num ano são disponibilizados nos princípios do mês de Abril do ano seguinte.

Observe-se então na figura [3.4] a variação do preço das EUAs em Abril de 2009, ou seja, quando é disponibilizado o relatório das emissões verificadas em 2008:

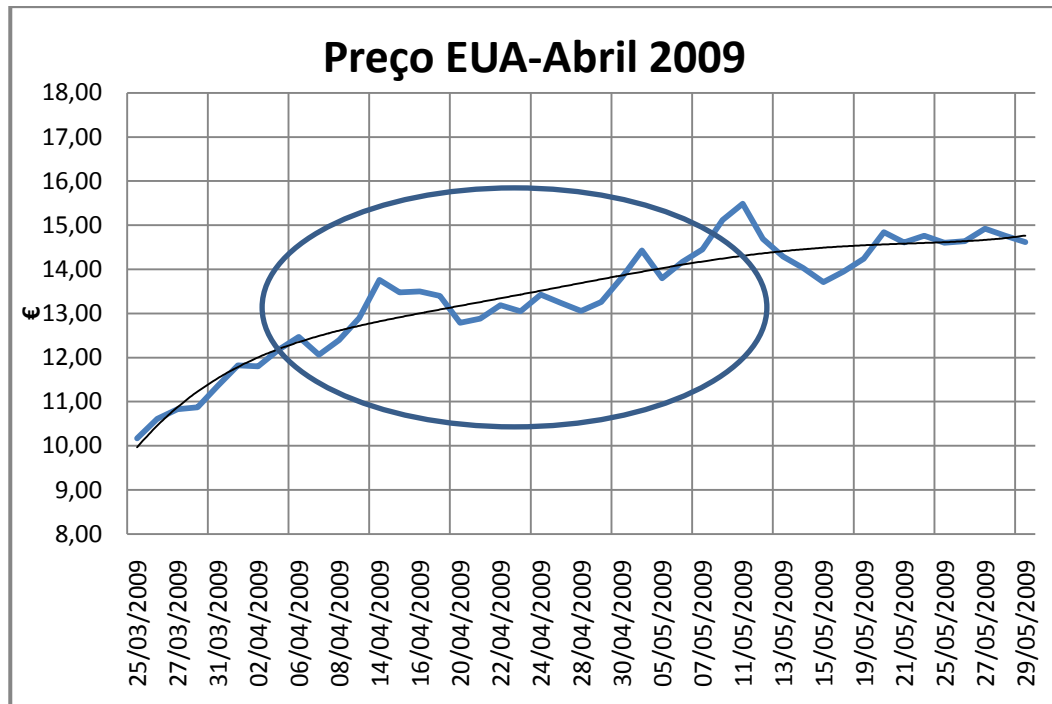


Figura 3.4-Preço EUA Abril 2009

È visível a subida dos preços das licenças de emissão, o que era espectável tendo em conta que as emissões verificadas foram superiores às EUAs alocadas. Atente-se agora ao preço spot das EUAs em Abril de 2010 (figura [3.5]). Recorde-se que em 2009 a alocação de EUAs foi bastante superior às emissões, ou seja, será expectável que a procura em Abril de 2010 decresça e conseqüentemente o preço das licenças de emissão também baixe:

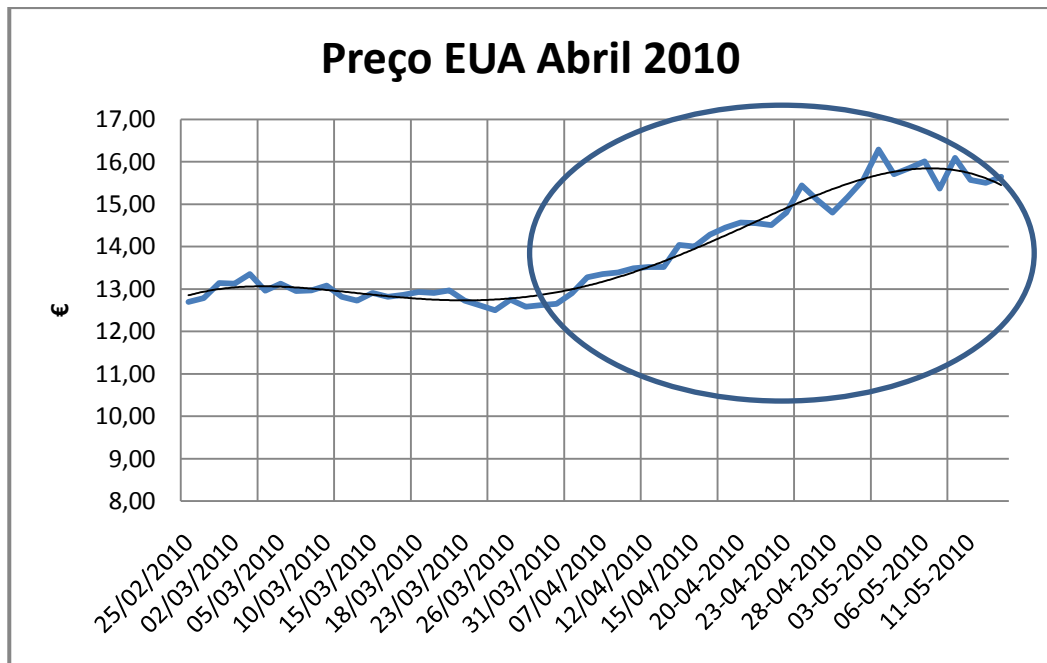


Figura 3.5 Preço EUA Abril 2010

Observando a figura [3.5] podemos verificar a subida dos preços em Abril, contrariando assim a tendência de estabilidade que se ia mantendo até essa altura. Tendo em conta os resultados de emissões verificadas, tal subida não era de esperar, de facto todos os sectores, exceptuando o 1, emitiram menos CO<sub>2</sub> do que o que lhe foi atribuído no início de 2009. É então possível confirmar a grande influência que o sector 1 exerce no mercado de carbono. Os participantes deste sector, muito provavelmente ao verificarem os resultados das emissões verificadas, acorreram à compra de EUAs que por sua vez aumentaram 3 € até ao final de Abril de 2010, não sendo suficiente a redução de emissões, por parte de todos os outros sectores, para baixar os preços das licenças de emissão.

### 3.2.3 - Planos de Alocação Nacional-Observações Finais

De todos os países que estão ao abrigo do CELE o que recebe mais licenças de emissão é a Alemanha: 20% de todas as EUAs atribuídas.

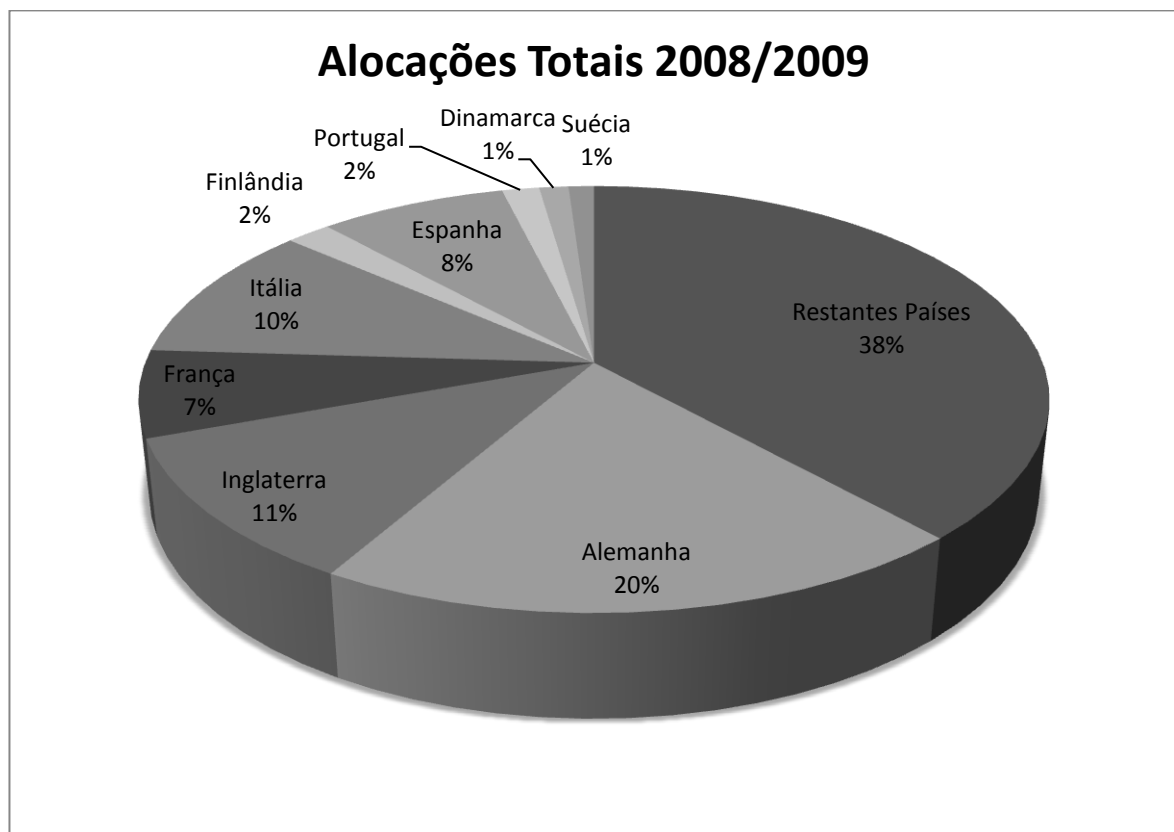


Figura 3.6-Alocações 2008/2009 [43]

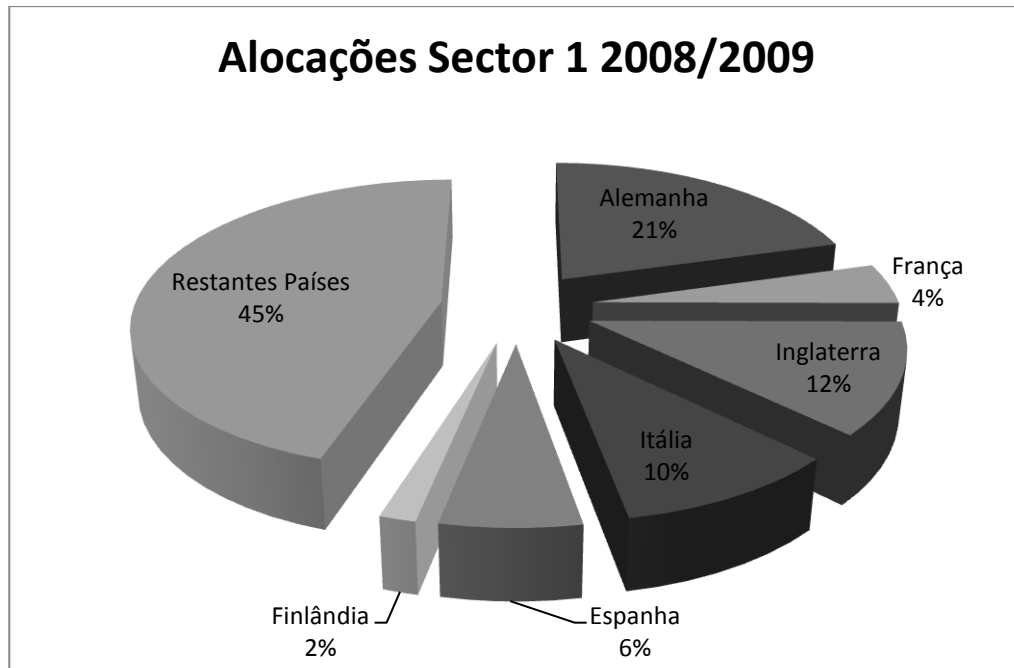


Figura 3.7-Alocações Sector 1 2008/2009 [43]

Na figura [3.7] podemos observar as atribuições de licenças de emissão, dentro do sector 1, pelos países ao abrigo do CELE.

Mais uma vez a Alemanha é a que tem direito a poluir mais.

É então plausível esperar que o sector 1, mais concretamente as indústrias deste sector localizadas na Alemanha, será o que provavelmente terá mais influência no preço do carbono.

### 3.3 - Índices de produção industrial Vs Preço EUA

#### 3.3.1 - Motivação para Análise

Num mercado de Carbono onde haja fácil acesso a informação fiável, sem grande espaço para especulação, deverá haver causalidade entre o preço das EUAs e o índice de produção das indústrias que participam neste mercado, ou seja havendo um aumento do índice de produção industrial haverá naturalmente um aumento das emissões de gases poluentes como o CO<sub>2</sub>. Se o aumento das emissões, das empresas que estão ao abrigo do CELE, for significativo será expectável que haja um aumento da procura das licenças de emissão. Então pela lei da oferta e da procura, o preço das EUAs subirá. Pelo mesmo princípio, uma diminuição significativa do índice de produção industrial deverá conduzir a uma diminuição na procura de EUA e a consequente baixa dos preços desta. Fará então todo o sentido estudar o impacto da variação do Índice de Produção Industrial, das empresas que negociam no mercado de Carbono, no preço das licenças de emissão.

### 3.3.2 - Estudo da Correlação

Na figura [3.8] mostra-se a relação entre as variáveis Preço da EUA e Índice de Produção Industrial. Este índice é baseado nas estimativas disponibilizadas pelo Eurostat. Não obstante, estes dados concernem apenas a valores mensais e, aquando da investigação, só estavam disponíveis para 2008 e 2009. De facto, essa limitação por si só impossibilita a utilização desta variável no modelo de previsão, visto que essa informação é lançada tardiamente. No entanto o estudo da interacção entre estas duas variáveis mantém a sua importância, de maneira a que seja compreensível quais os factores que influem no preço das EUAs em 2008 e 2009.

O Índice de Produção Industrial criado representa a média do índice de produção industrial das empresas que negociam no mercado de carbono, excluindo Centrais de geração de energia eléctrica. Optou-se por esta exclusão, visto que devido à grande atribuição de licenças de emissão a este tipo de centrais, a influência destas, isoladamente, foi, como se mostrará mais à frente, de grande preponderância na variação dos preços das EUA em alguns intervalos entre 2008-2009 e principalmente nos inícios de 2010.

Tendo em conta que os valores do Índice de Produção Industrial são mensais, optou-se por se calcular a média mensal do preço das licenças de emissão, para que a comparação das séries seja feita no mesmo formato.

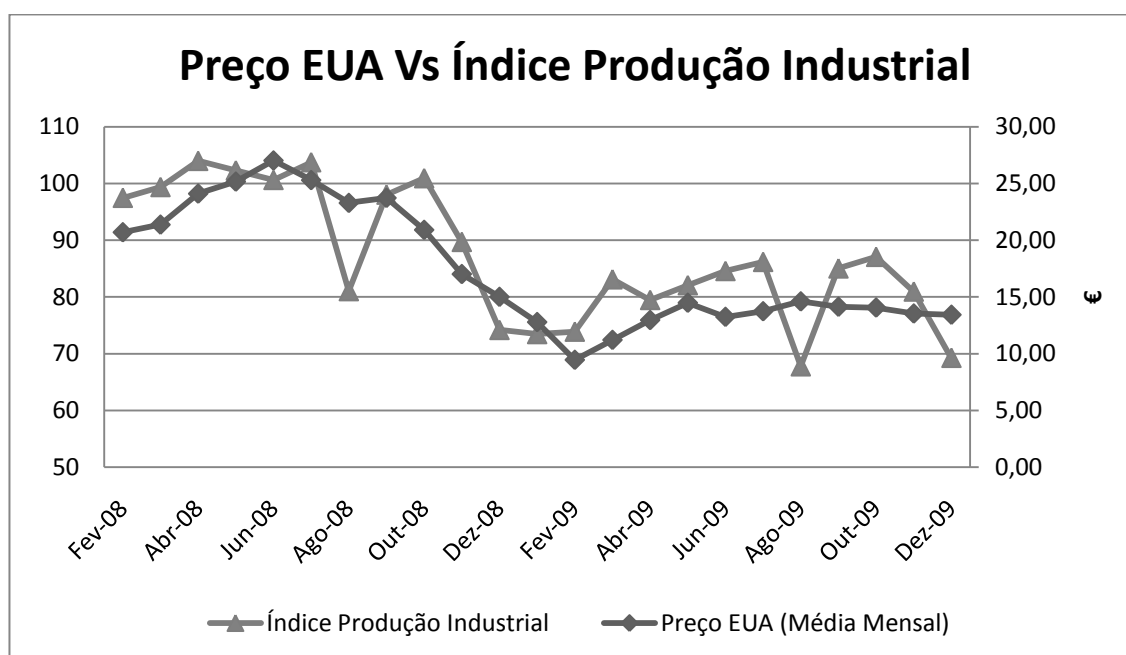


Figura 3.8- Índice Produção Industrial Vs P EUA [44].

Observando a figura [3.8] fica patente que, tal como era expectável, existe uma forte relação entre o Índice de Produção Industrial e o Preço das EUAs. No entanto há que ter em atenção que a partir de Agosto de 2009 deixa de se verificar a similaridade de comportamentos das duas variáveis, de facto é visível que neste período se constatou uma diminuição bastante pronunciada no Índice de Produção Industrial que, por sua vez, não se verifica nos preços do carbono. Tal facto poderá indiciar que o Índice de Produção Industrial não é o principal “driver” do preço das EUAs.

Todas as variáveis independentes (exceptuando os NAPs e Relatórios de Emissões) estudadas ao longo da análise exposta no presente capítulo, estão fortemente interligadas entre si. O preço do petróleo é influenciado não só pela especulação como também tem uma forte relação com a actividade económica, por sua vez os preços de electricidade estão também correlacionados com a actividade económica e preços dos combustíveis fósseis, de tal maneira que é imperativa uma análise bastante cuidada de todas estas variáveis por via a determinar quais são de facto as melhores variáveis de entrada na Rede Neuronal.

Abaixo, na figura (3.9), apresenta-se uma análise de correlação cruzada entre Índice de Produção Industrial e Preço das EUAs. Esta análise serve para determinar qual a magnitude da influência nos Preços das EUAs por parte do Índice de produção Industrial. Mais ainda, este tipo de análise permite determinar o desfaseamento entre as duas séries de preços. Para o estudo da correlação cruzada foi utilizado o software SPSS.

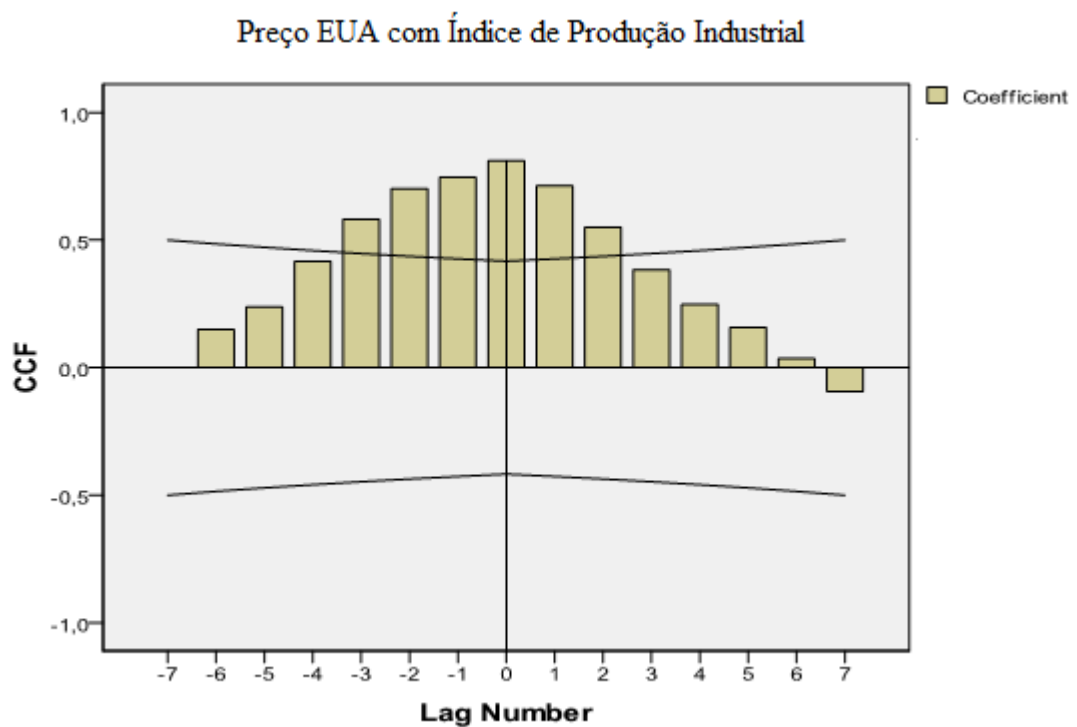


Figura 3.9-Correlação Cruzada-Preço EUA com Índice de Produção Industrial

Observando então a figura (3.9), podemos ver que a barra com maior magnitude está localizada em 0, mas convém realçar o facto de que as barras localizadas no eixo horizontal negativo são maiores que as localizadas no eixo horizontal positivo, ou seja a barra localizada em -1 tem maior magnitude que a localizada em 1 e assim sucessivamente. Perante isto, numa forma simples, pode-se concluir que os valores passados ( $D-n$ , onde  $n$  representa o atraso) e presentes ( $D$ ) do Índice de Produção Industrial são os que mais influenciam o valor presente do Preço da EUA. Mais ainda esta análise, apesar de neste caso ser bastante óbvio, permite provar que é o Índice de Produção Industrial a influir no Preço das EUAs e não o contrário.

Convém referir que pelo facto de estarmos perante uma comparação entre valores mensais e o mercado de carbono ser diário, a análise feita é sempre acompanhada de alguma

incerteza, visto que não é possível escrutinar qual o verdadeiro impacto do aumento das produção das indústrias, ao abrigo do CELE, no preço diário das licenças de emissão, não obstante e a título de conclusão final está comprovada a similaridade de comportamento das duas séries estudadas neste subcapítulo (3.3).

### **3.4 - Preço do Petróleo Vs Preço EUA**

#### **3.4.1 - Motivação para Análise**

Os mercados liberalizados de acções assim como das “commodities” são muitas vezes dotados de comportamentos altamente voláteis e guiados pela especulação, o que faz com que o preço do bem a ser negociado não esteja directamente ligado com o valor real desse bem, mas sim com as expectativas dos participantes nos mercados. Por sua vez as expectativas dos participantes podem ser guiadas pela evolução dalguma variável que não esteja directamente correlacionada com o bem a ser negociado.

Olhando para o caso específico do mercado de carbono, seria de esperar os preços das EUAs variassem directamente com os índices de produção das indústrias presentes no CELE, todavia foram observadas incongruências na relação Preço EUA/Índice de Produção Industrial, como tal surge a necessidade do aprofundamento da investigação de mais “drivers” do mercado de carbono.

Os preços do petróleo em situação normal reflectirão o estado da economia no mundo, visto que com um elevado consumo de combustíveis, seja ao nível dos transportes, da produção industrial ou consumo doméstico, é expectável a subida dos preços deste bem. Por sua vez, uma economia em recessão deverá levar á queda desses preços. Todavia, é do conhecimento geral que nem sempre isso acontece e comportamentos do preço do petróleo não reflectem somente o estado da economia como também as expectativas dos participantes nesse mercado, havendo a possibilidade de haver discrepâncias entre Índice de Produção Industrial e Preço de Petróleo. Tais discrepâncias afastam a hipótese de co-linearidade entre Preço Industrial e Preço de Petróleo.

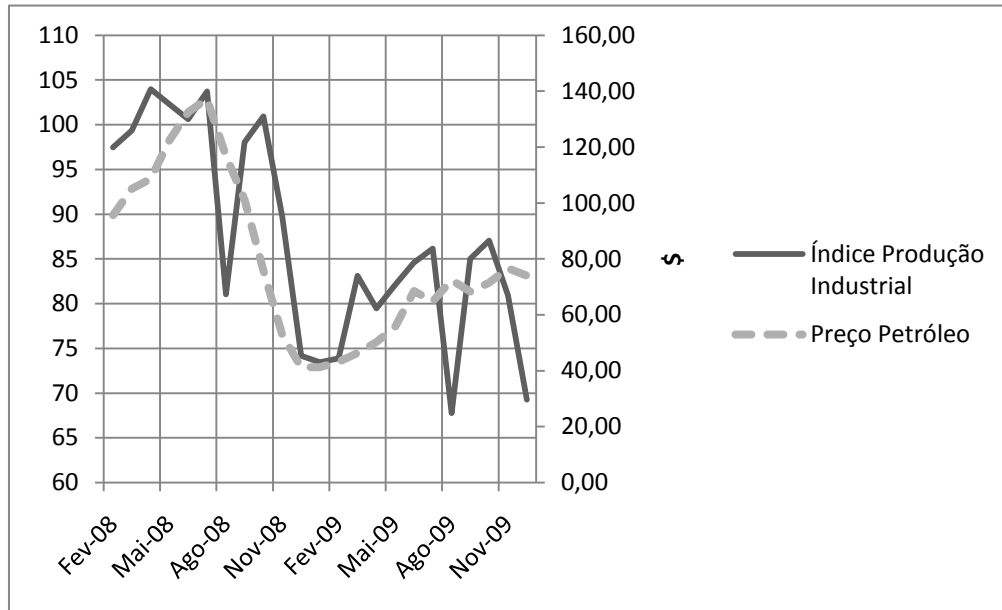


Figura 3.10-Índice de Produção Industrial Vs Preço de Petróleo

De facto, observando a figura (3.10) pode-se confirmar a correlação entre as duas variáveis, mas como esperado há várias variações no Índice de Produção Industrial que não se reflectem no Preço do Petróleo e vice-versa. Ou seja, elimina-se assim a hipótese de colinearidade entre as duas variáveis, condição essa que se deve verificar entre as variáveis de entrada num modelo de previsão.

No caso particular do CELE, é esperado que o Petróleo exerça influência na medida em que é sabido que os combustíveis fósseis são os principais responsáveis pela libertação de gases de efeito de estufa, consequentemente, muitas das indústrias abrangidas pelo CELE utilizam como matéria-prima esses combustíveis fósseis. Para além disso desde sempre que os preços do Petróleo são uma referência importante para os preços doutros combustíveis fósseis, como por exemplo: o Gás Natural, muito utilizado em centrais térmicas de produção de energia eléctrica.

Para além disso, apesar de estarmos já no segundo Período de Cumprimento, o mercado de carbono é ainda relativamente recente e como já foi visto não haverá necessariamente causalidade entre o aumento de emissões e os preços das EUA, de facto é de esperar que a especulação represente um papel muito importante na variação dos preços. Por isto é bastante plausível testar a correlação entre a variável Preço de Petróleo e a variável dependente Preço das EUA. De ter em conta, que o preço de Petróleo usado foi o preço do barril de Brent, que serve de referência na Europa.

### 3.4.2 - Estudo da Correlação

A figura [3.11], mostra os preços (diários) do petróleo e das EUAs para os anos de 2008, 2009 e os primeiros meses de 2010.

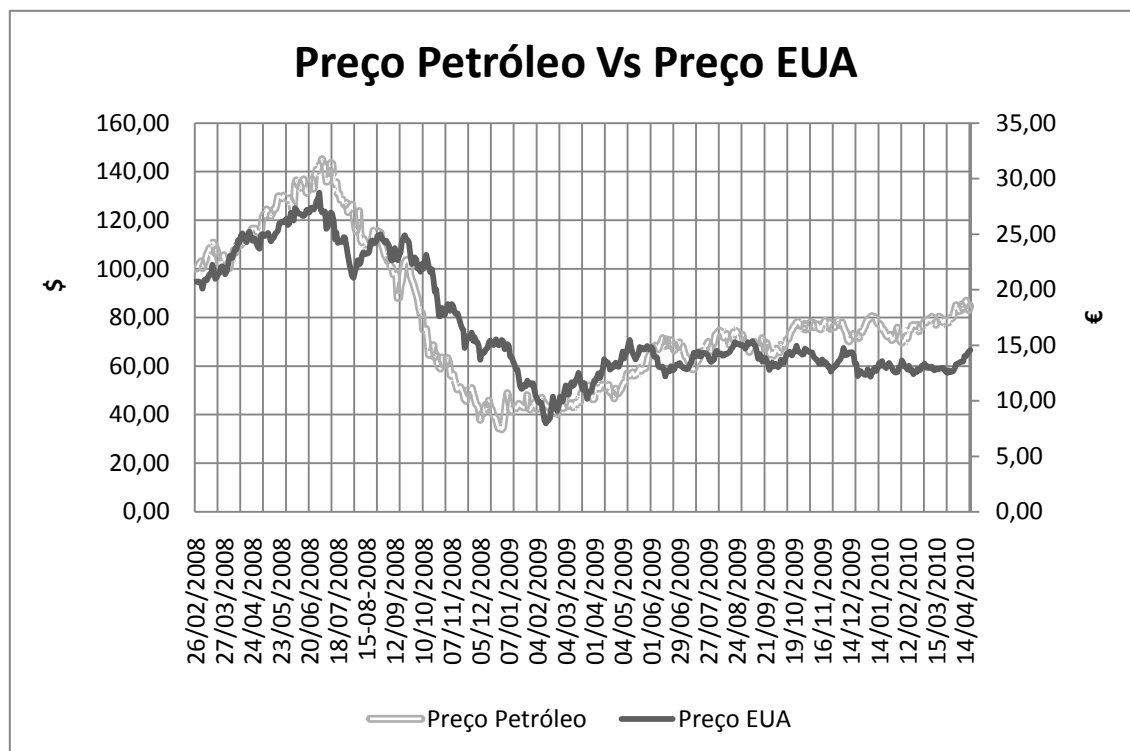


Figura 3.11-Petróleo Vs Preço EUA

Constata-se então, por observação da figura (3.11) que o Preço do Petróleo e o Preço da EUA estiveram correlacionados. Não obstante, convém atentar a alguns períodos em particular, nomeadamente de Setembro de 2008 a Fevereiro de 2009. Nesta fase é perceptível um ligeiro desvio do Preço das EUAs em relação ao Preço do Petróleo, mais ainda, os mínimos destas duas séries de preços ocorrem em fases diferentes. Enquanto o valor mais baixo das EUAs, 9.06€, ocorreu a 10 de Fevereiro de 2009, o Petróleo atingiu o o mínimo, 39\$, no dia 28 de Dezembro de 2008. Como se irá mostrar nas secções à frente ([3.5],[3.6]), estas discrepâncias, verificadas em relação ao Preço de Petróleo, são explicadas pelos preços de Electricidade e pelos mercados de acções que nesta investigação estão representados pelo Euronext 100.

Um facto muito importante concerne ao ano de 2010. Como já referido, os modelos de previsão criados só produzem resultados fiáveis para esse ano. Apesar de não ser facilmente visível, em 2010, as séries Preço de Petróleo e Preço da EUA não apresentam qualquer tipo de relação entre si. Atente-se á figura (3.12):

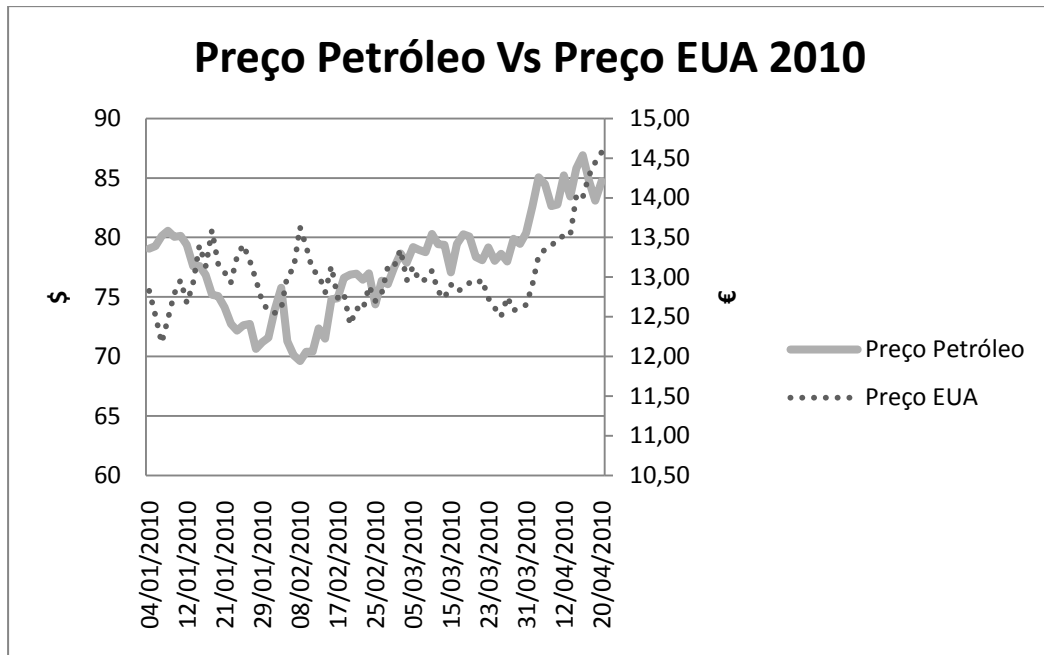


Figura 3.12-Preço Petróleo vs Preço EUA (2010).

Como se pode ver, em 2010, principalmente até Abril não é visível influência do Preço do Petróleo no preço das EUAs. A partir de Abril, parece haver algum seguimento do Preço do Petróleo, por parte do Preço das EUAs, todavia esta poderá ser uma conclusão errónea, visto que como já mostrado anteriormente na secção [3.2.3], o factor que se apresenta como mais determinante na subida dos preços das EUAs, em Abril, é a dicotomia NAP/Relatório de Emissões. De facto em Abril há várias inflexões na série Preço do Petróleo que não se verificam no Preço das EUAs.

Fazendo agora a análise da correlação cruzada entre as duas séries ao longo de 2008,2009 e 2010:

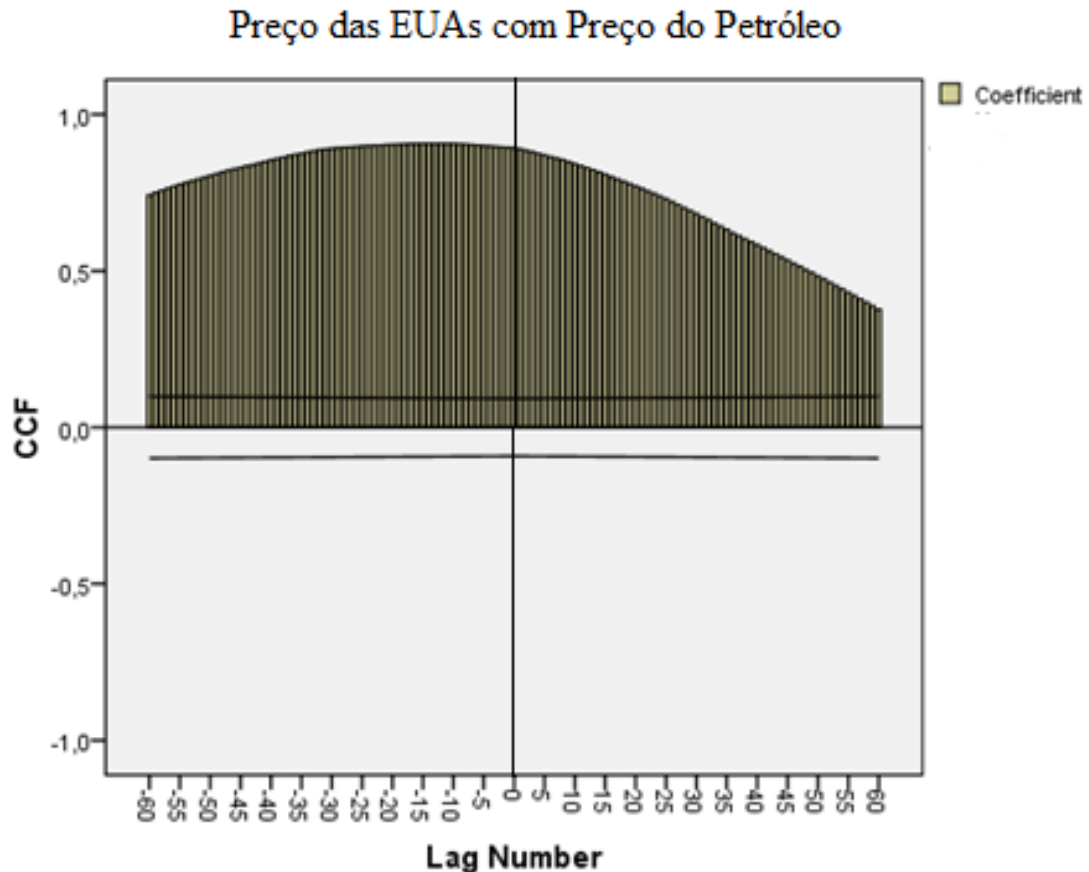


Figura 3.13-Correlação Cruzada- Preço EUA com Preço Petróleo

A informação mais importante que se recolhe desta análise é que os preços passados do petróleo são os que mais influenciam a variação presente do Preço da EUA. De facto a barra em D-15 é a que mais influencia o preço da EUA em D, com um valor de 0,907 de correlação cruzada com Preço EUA. Todavia, há que ter em conta o facto de haver algumas inconsistências em relação á dependência total do preço do petróleo por parte do preço da EUA, nomeadamente e como já referido de Setembro de 2008 a Fevereiro de 2009.

### 3.5 - Preço da Energia Eléctrica Vs Preço EUA

#### 3.5.1 - Motivação para Análise

As centrais térmicas de produção de energia eléctrica, de todas as indústrias que negociam e que têm obrigações legais de devolução de licenças de emissão, são as que mais EUAs recebem por ano.

Como tal, o papel que estas assumem no comércio de emissões é preponderante, sendo que são representadas neste estudo sob a forma da variável Preço Electricidade.

É importante referir que os preços de electricidade variam com factores como: preço de combustíveis, consumo energético e a percentagem deste que é alimentado via energias renováveis.

Ao serem influenciados por estas variáveis tem que se ter em conta que os preços de energia eléctrica contêm informação implícita que é da maior importância para o problema em questão: a variação dos preços das EUAs. Essa informação pode ser decomposta nos dois seguintes pontos:

- Os preços da electricidade, ao variarem com o consumo, dão em primeiro lugar sinais da situação económica dum país. Visto que com um crescimento económico elevado, maior será o consumo e consequentemente maior será a necessidade de produção de energia eléctrica, aumentando também o preço da electricidade. Todavia é preciso ter em conta que esta influência tem uma maior preponderância a longo prazo.

Mais ainda, como já foi referido várias vezes ao longo deste capítulo, com um aumento de produção, neste caso de electricidade via centrais térmicas, haverá também mais emissões de CO<sub>2</sub>; Logo a procura das EUAs aumentará e consequentemente o preço destas irá subir com o preço da energia eléctrica. O inverso, também se verifica, ou seja, com menor consumo há menor produção de energia eléctrica via centrais térmicas, o que tem influi na baixa dos preços de electricidade. Havendo menos produção das centrais térmicas, há menos emissões de CO<sub>2</sub>, logo menos procura de licenças de emissão e, consequentemente, o preço das EUAs baixa.

- Uma central térmica tem custos de operação muito mais elevados que os custos de funcionamento de uma fonte de energia renovável.

Negociando a energia eléctrica num mercado livre, ao haver uma grande percentagem de energias renováveis a alimentar o consumo energético de um país, menor será a percentagem de energia a fornecer via Centrais Térmicas.

Assim sendo o preço final da energia eléctrica baixa também.

Mais ainda, não havendo produção de energia por parte das centrais térmicas, as emissões de gases de efeito de estufa baixa, consequentemente a procura das EUAs diminui e, por via disto, o preço também.

Desta forma, é previsível uma forte correlação entre as variáveis “Preço da Energia Eléctrica” e “Preço das EUAs”.

### 3.5.2 - Análise da Correlação

De seguida, mostram-se graficamente as curvas das variáveis acima referidas ao longo dos anos de 2008, 2009 e princípios de 2010. Os preços de Energia Eléctrica são retirados do mercado spot EXAA para entrega na Alemanha e Áustria que, por motivos já explicitados nas secções [3.2.2] e [3.2.3], é o indicador mais fiável para representar os preços da Electricidade.

De referir que os valores dos diários de ambas as variáveis foram sujeitos a uma suavização de 10 dias (média de 10 dias), de forma a eliminar o ruído que caracterizava principalmente a curva associada ao preço de electricidade, desta maneira facilita-se a observação das interacções entre as duas séries.

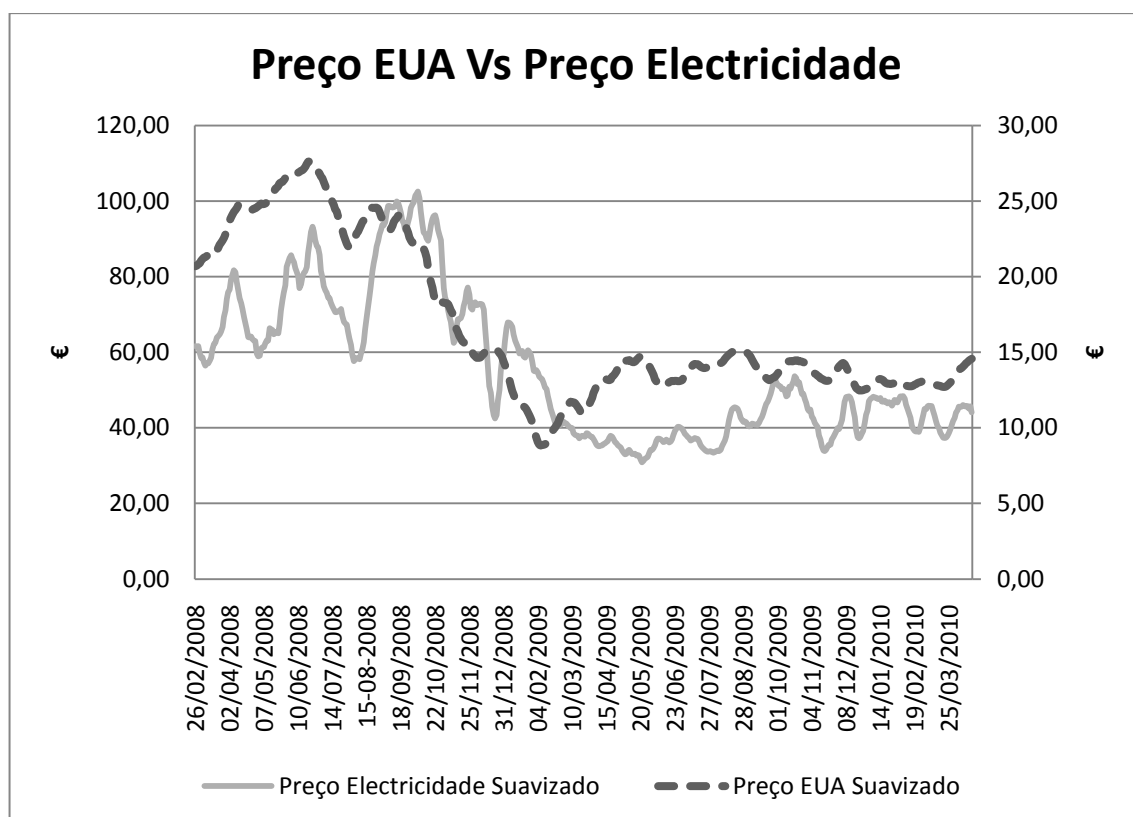


Figura 3.14-Preço EUA Vs Preço Electricidade

Na figura [3.14] é visível, tal como era expectável, uma grande influência dos preços de Electricidade no mercado de carbono. De facto atente-se agora ao período que vai de Setembro de 2008 a Fevereiro de 2009. Convém lembrar que foi nesta fase que houve a mais acentuada discrepância entre os preços do Petróleo e o preço das EUAs, surgindo assim os Preços da Electricidade como principal variável explicadora nesta fase. De facto podemos concluir uma complementaridade entre Preço de Petróleo e Preço da Electricidade na condução do mercado de carbono.

Atente-se agora ao período que se estende desde meados de Novembro de 2009 a Abril de 2010. Nesta fase o Preço da Electricidade surge como único “driver” do mercado de carbono. Mais ainda, exceptuando para Abril de 2010, a partir de Dezembro de 2009, a série de preços EUAs apresenta uma maior estabilidade comparativamente com 2008 e 2009. Observe-se então mais pormenorizadamente este período na figura (3.15).

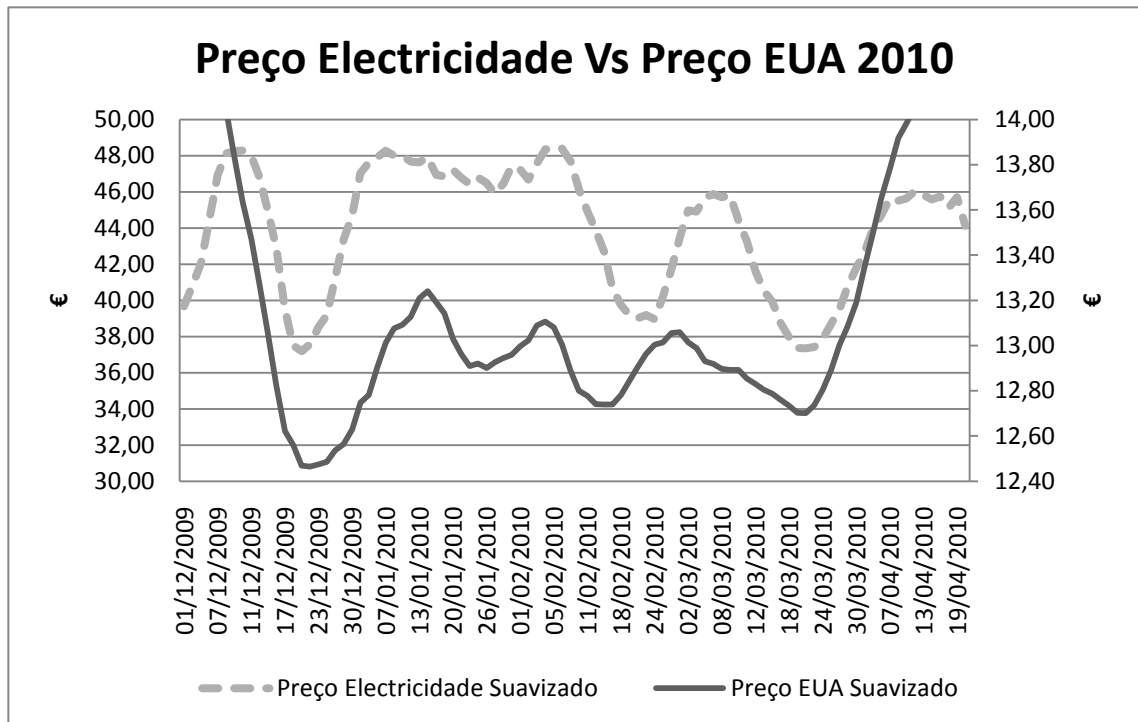


Figura 3.15-Preço EUA Vs Preço Electricidade 2010

Por observação da figura (3.15) fica patente a forte correlação entre as duas variáveis. Convém lembrar que os modelos de previsão só são eficazes em nos fins de 2009 e em 2010. De facto, para 2008 e 2009 não foi possível, segundo a investigação feita, a construção de modelos de previsão que apresentassem resultados eficazes para vários conjuntos de teste.

## 3.6 - Euronext 100 Vs Preço EUA

### 3.6.1 - Motivação para Análise

Citando Keppler e Mansanet [28] “Num Mercado eficiente, os preços das acções são iguais aos fluxos esperados de dividendos futuros. Os dividendos futuros, por sua vez, dependem de lucros e receitas futuras, sendo que estes dependem muito do crescimento da actividade económica”.

Como tal os mercados de acções são muito bons indicadores das expectativas em relação ao crescimento económico.

É de esperar que a correlação entre os mercados de acções e o mercado de carbono seja elevada, não só porque com uma actividade económica, em baixa, é representativa de pouca produtividade e logo menos emissões de carbono, mas também porque a especulação susceptível de existir nos mercados de carbono poderá ser conduzida também pelos mercados de acções.

### 3.6.2 - Análise de Correlação

De seguida, na figura [3.16] mostra-se o gráfico com as curvas relativas à evolução em 2008 e 2009 e inícios de 2010 das variáveis Euronext 100 e Preço da EUA. Como já realizado em análises anteriores procedeu-se à suavização das duas variáveis de forma a eliminar o ruído presente na série Euronext 100 e, desta forma, facilitar a observação da evolução das mesmas.

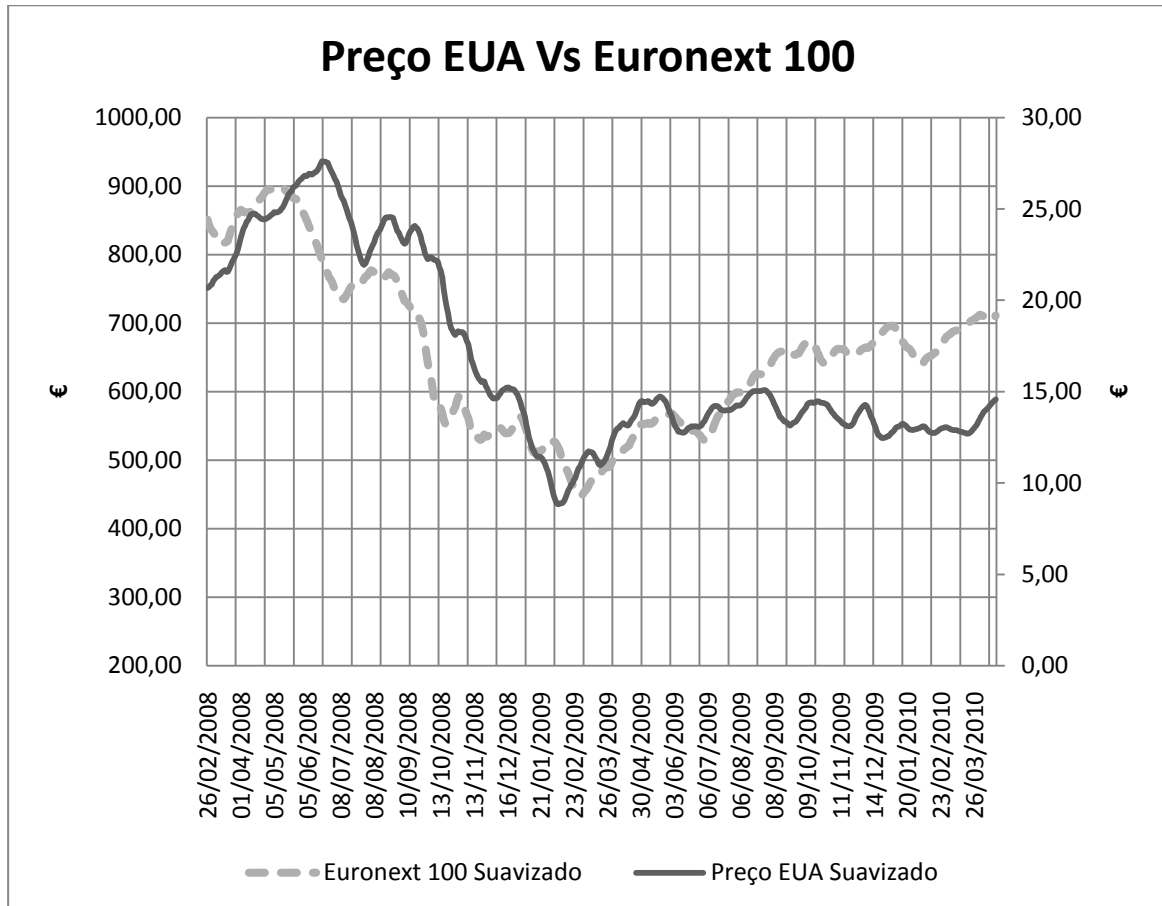


Figura 3.16-Preço EUA Vs Euronext 100

Como esperado, as duas variáveis apresentam comportamentos bastante semelhantes principalmente até Julho de 2009. De facto os mínimos das duas séries ocorrem em fases muito próximas, algo que não se verifica nem para o Preço do Petróleo e Preço de Electricidade. Todavia em 2010, como no caso do Petróleo, há um desvio do comportamento as duas séries, como se pode ver mais pormenorizadamente na figura (3.17):

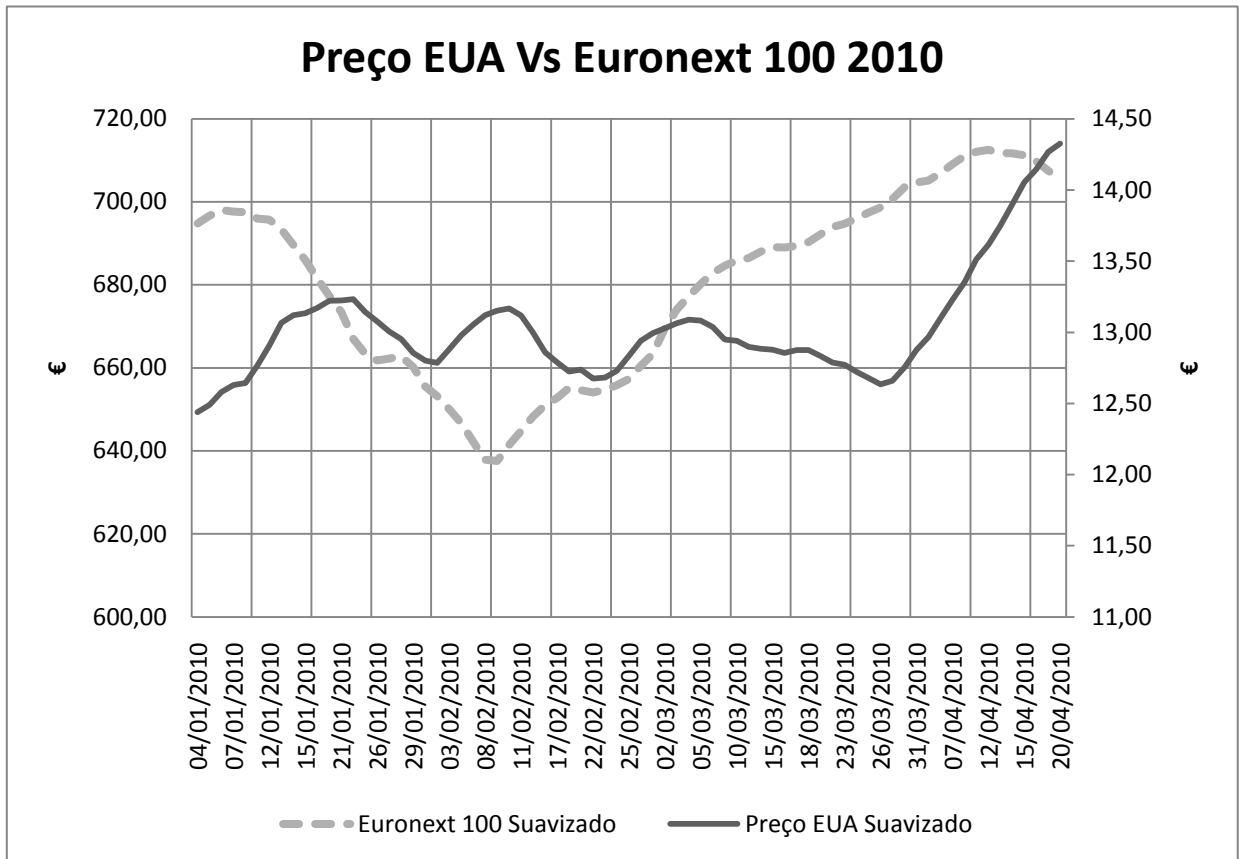


Figura 3.17-Preço EUA Vs Euronext 100 2010.

Confirma-se então a discrepância entre o comportamento das duas séries. De referir então que os preços de Electricidade surgem então como única variável explicadora do Preço EUA em 2010.

De seguida na figura (3.18) apresenta-se o gráfico com a correlação cruzada entre Preço EUA com Euronext 100:

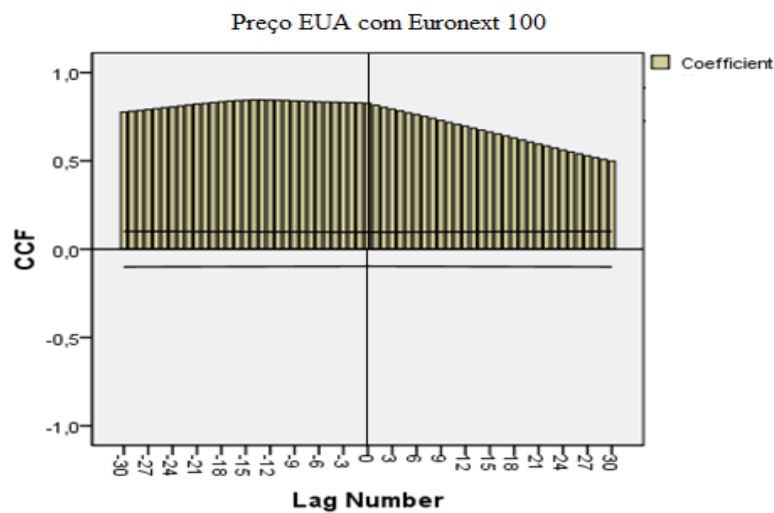


Figura 3.18-Correlação Cruzada. Preço EUA com Euronext 100

Pela análise da figura (3.18), comprova-se que são os mercados de acções, de maneira geral, a influir no mercado de carbono e não o contrário. Mais ainda convém destacar o valor alto de correlação cruzada 0,845, em D-13, reforçando-se assim a ideia de que os valores passados dos índices dos mercados de acções têm uma influência relevante no preço do carbono. Apesar de em 2010 tal influência não ter sido observada, é preciso ter em conta que o espaço de tempo é ainda curto para tirar conclusões seguras. No entanto, pode-se esperar que a influência dos mercados de acções seja mais visível a longo prazo e que não tenha influência a curto prazo que é o horizonte de previsão para o qual se pretendem prever os preços das EUAs.

### 3.7 - Análise Isolada da Série Preço da EUA

#### 3.7.1 - Motivação para Análise

É vital analisar a evolução dos preços das EUA ao longo do tempo, de maneira a que seja possível extrair informação que se possa revelar relevante para a previsão dos preços das EUAs. Nomeadamente examinar-se-á a Auto-Correlação que, de uma forma simples, representa a Correlação Cruzada de uma série com ela própria. Será também apresentada a análise da auto-correlação parcial que, no estudo de series temporais, representa um papel importante na análise de informação direccionada para detectar atrasos num modelo auto-regressivo.

Resumindo, o mais importante é procurar identificar ciclos que revelem padrões temporais que influenciem o mercado de carbono. De ter em conta que é também indispensável detectar irregularidades e verificar se as mesmas são normais.

#### 3.7.2 - Análise de Correlação

Fez-se então a análise da auto-correlação e auto-correlação parcial:

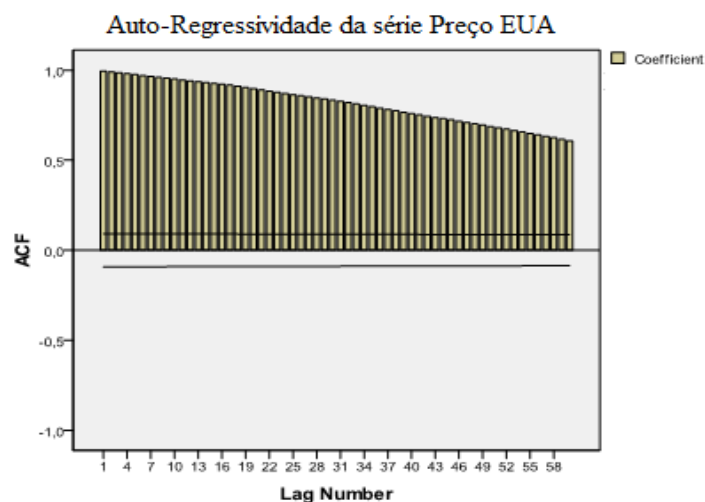


Figura 3.19-Autocorrelação da Série Preço EUA

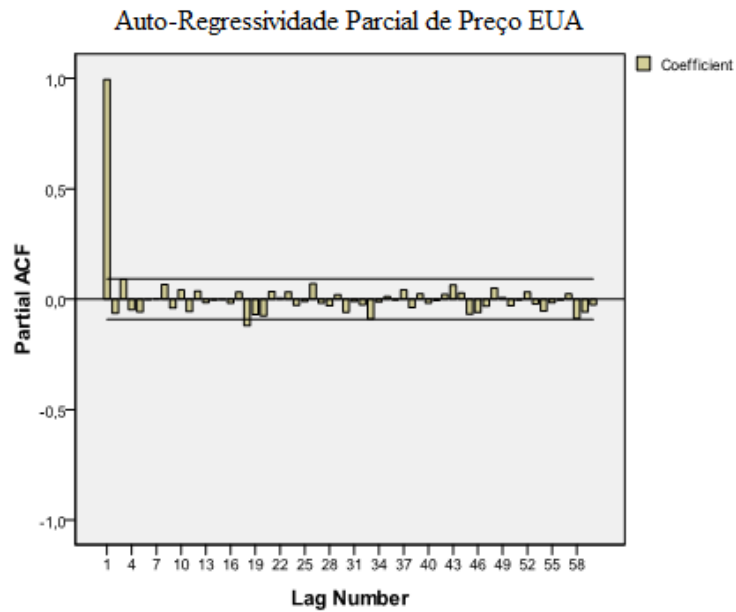


Figura 3.20-Autocorrelação Parcial Série Preço EUA

Analisando os resultados, verificamos que não há nenhuma observação relevante, sendo que não se verifica qualquer sazonalidade ao longo dos anos de 2008,2009 e 2010. Então o único resultado a reter é a forte auto-regressividade de ordem 1. Esta informação é de grande importância na medida em que aquando dos testes feitos ao modelo de previsão verificou-se que a inclusão de dados relativos a auto-regressividade produziam uma diminuição significativa dos erros das previsões efectuadas.

### 3.8 - Conclusões Finais

Juntando todas as observações feitas em relação à análise do comportamento do preço das EUAs ao longo do, ainda decorrente, 2º período do CELE, fica bem patente a imaturidade deste mercado. De facto, ao longo de 2008 e 2009 a volatilidade dos preços do carbono foi elevada, com as variáveis “Preço de Petróleo”, “Euronext 100” e “Preço de Electricidade” a alternarem entre si o papel de principal variável explicadora, ao longo destes dois anos. Não obstante, apesar de ainda ser muito cedo para afirmar tal, 2010 revela-se como um ano onde se verificam sinais de uma possível aprendizagem por parte dos “players”, visto que os preços das EUAs apresentaram-se muito mais estáveis e com as suas variações explicadas pelo Preço de Electricidade na Alemanha e a dicotomia NAP/Relatório de Emissões. A verdade é que tendo em conta os argumentos das secções [3.2.3, 3.2.4 e 3.5.1] o Preço de Electricidade e Relatório de Emissões apresentam-se, para o futuro, como os mais lógicos “drivers” dos preços das licenças de emissão, todavia a especulação representa uma parte importante na determinação dos preços em qualquer mercado, sendo que estes por vezes apresentam comportamentos que não demonstram causalidade em relação às variáveis que normalmente explicam a variação dos preços. É então vital uma constante e cuidada monitorização dos dados que explicam os preços das EUAs, para que se necessário se actualize o modelo de previsão e este forneça resultados fiáveis.

Convém referir que optou-se por não se realizar a análise da causalidade do mercado de carbono com as variáveis climáticas, visto que se entende que a influência destas no preço das EUAs está implícita no preço de electricidade, como aliás já foi referido no segundo capítulo tanto no estudo [29] como também no modelo de previsão de electricidade em [21].

Deparou-se também com a dificuldade inerente à disponibilidade de informação necessária para um estudo ainda mais vasto no que diz respeito a “drivers”, de facto, não se conseguir encontrar dados suficientes sobre variáveis como CSS, CDS e Preço do Carvão, não sendo possível o estudo de correlação destas com Preço das EUAs. Não obstante, lembrando as conclusões das secções [2.4.1 e 2.4.2], o petróleo surge como “driver” principal do preço de todos os combustíveis fósseis e CSS e CDS estão implícitos no preço de electricidade, logo o estudo do preço do petróleo e electricidade é suficiente.

# Capítulo 4

## Modelo de Previsão

### 4.1 - Introdução

Após o estudo das variáveis, que influem nos preços das EUAs, parte-se para a construção do modelo de previsão. O objectivo final desta parte da investigação é a construção de um modelo de fácil implementação, rapidez de funcionamento e que produza resultados da máxima fiabilidade possível.

Para tal é necessária uma série de testes de forma a definir o horizonte máximo para o qual se conseguem prever valores da variável de saída; a amplitude do histórico a utilizar, ou seja, de quantos dias se utiliza informação para treino da Rede Neuronal; quais as variáveis a utilizar e o tratamento a que estas serão sujeitas, etc.

Este próximo capítulo é dedicado à exposição e descrição do modelo final de previsão de preços das EUAs em mercado spot, assim como as definições da Rede Neuronal escolhida para servir de ferramenta de previsão. Serão apresentados os resultados, do modelo proposto, para vários intervalos, ao longo deste primeiro semestre de 2010, e a avaliação desses mesmos resultados perante o método de medição do erro escolhido.

### 4.2 - Descrição do modelo

A selecção das variáveis utilizadas no modelo de previsão é feita com base no estudo já descrito no capítulo 3.

Como tal, e tendo em conta as grandes diferenças observadas entre o comportamento dos preços das EUAs ( $P_{EUA}$ ) de 2008-2009 e 2010, optou-se por apenas se considerarem conjuntos, de treino e teste do modelo, referentes a 2010.

Tendo em conta que, em 2010, as influências verificadas dizem respeito ao Preço de Electricidade Spot na Alemanha ( $P_{Ele}$ ) e à Auto-Regressividade verificada na série temporal Preço EUA, as variáveis que foram utilizadas no modelo dizem respeito a esta informação. Em relação aos NAPs e relatórios de emissões verificadas, apesar de se constatar a influência

destes na variação dos preços em 2010, prever o impacto destes é praticamente impossível, visto que com a informação que se dispõe não se consegue para já treinar a rede de forma a esta fornecer resultados eficientes. Todavia aquando do desenvolvimento do modelo de previsão constatou-se que dependendo da amplitude do conjunto de treino é possível acompanhar as tendências dos preços do CO<sub>2</sub>, mesmo que não se inclua informação relativa aos NAPS e relatórios de emissões.

A ferramenta final de previsão que se desenvolveu, consiste em três modelos semelhantes, para previsão para D+1, D+2 e D+3. Assim sendo, de seguida, representam-se os modelos finais de previsão de preços spot das EUAs.

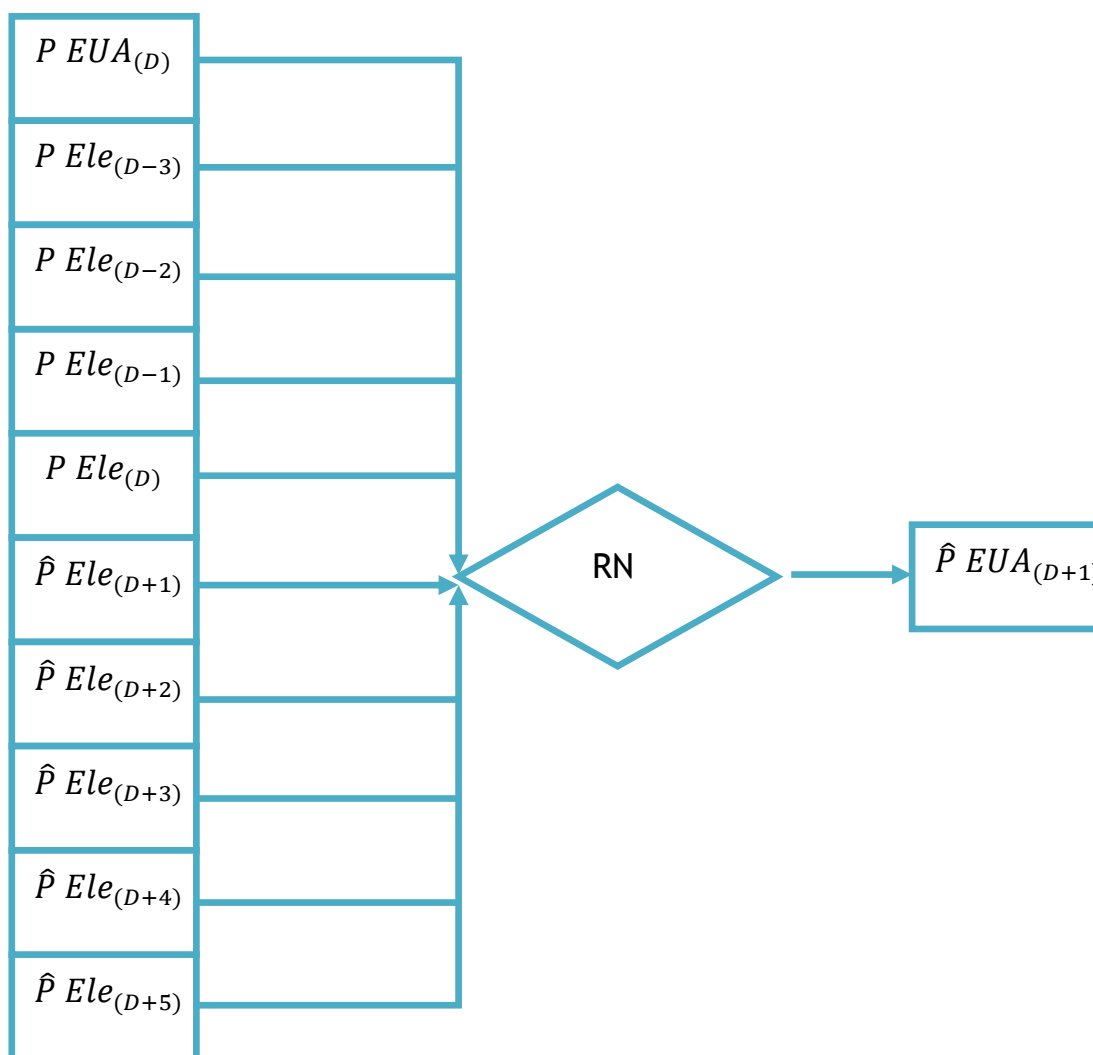


Figura 4.1 -Modelo de Previsão para D+1

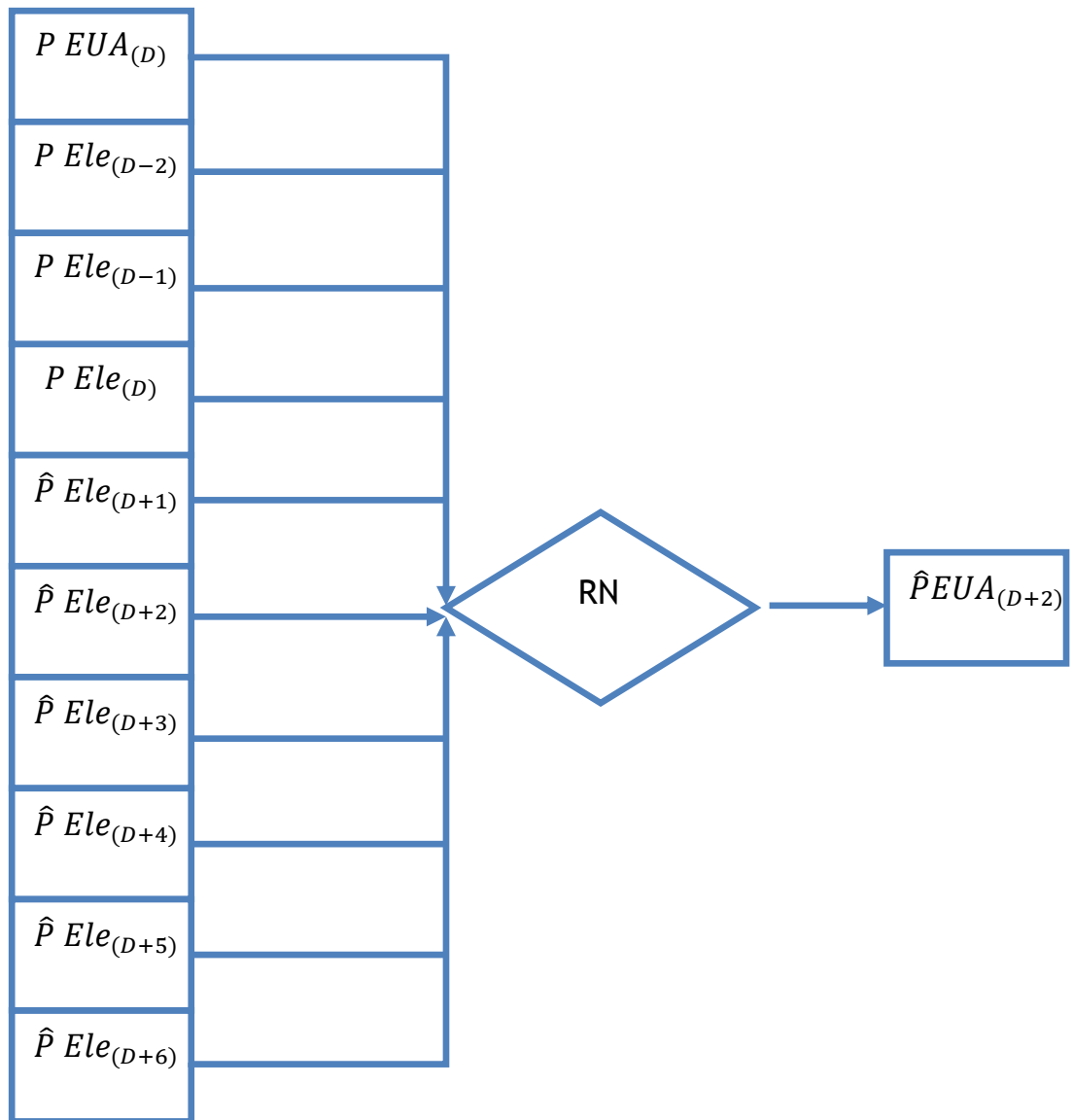


Figura 4.2-Modelo de Previsão para D+2.

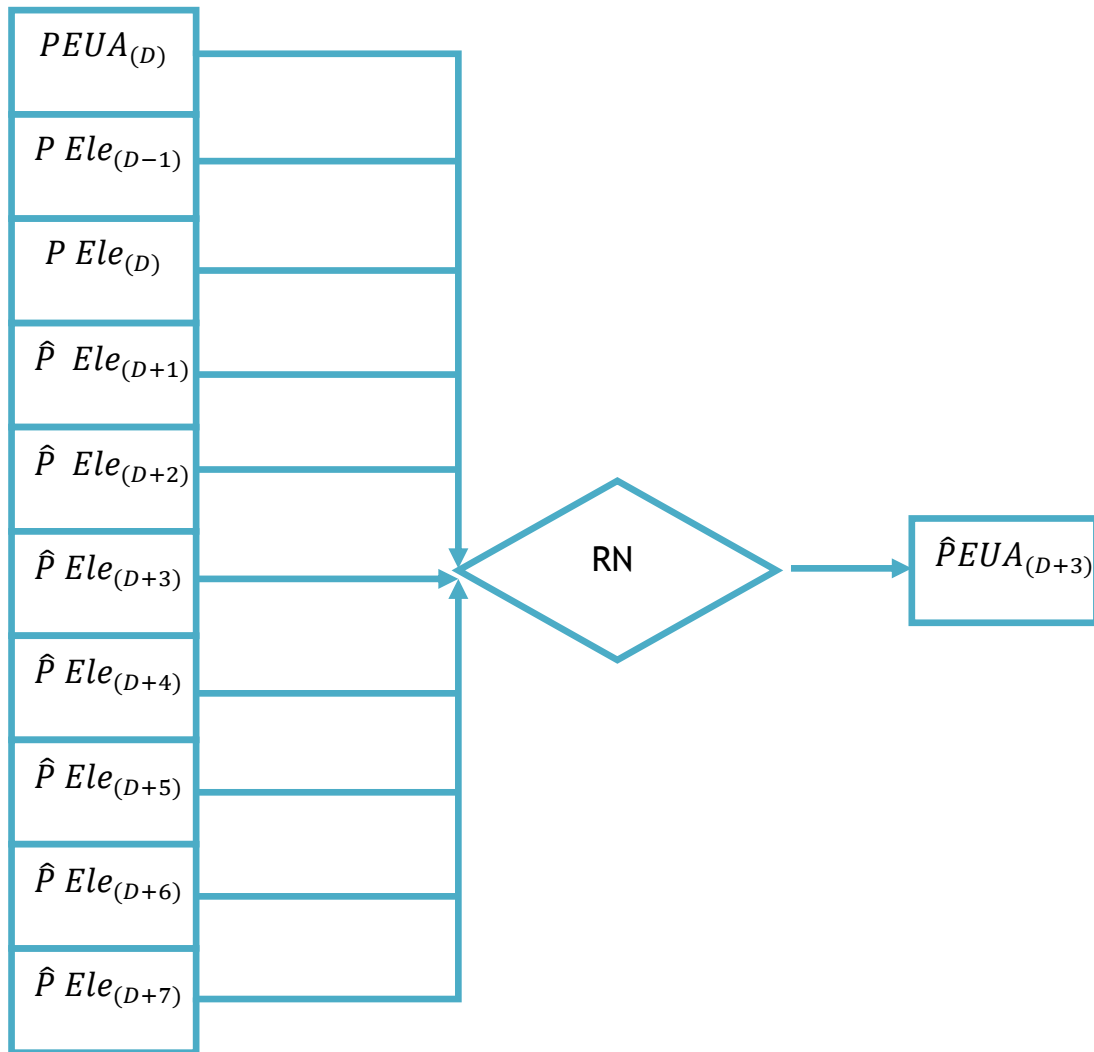


Figura 4.3-Modelo de Previsão para D+3.

De notar que a diferença entre os três modelos consiste apenas em utilizar intervalos diferentes de valores de  $P_{Ele}$  para cada um dos modelos. De facto, verificou-se que esta era a única maneira eficaz de prever  $P_{EUA}$  para cada um dos horizontes pretendidos, sendo que quando se tentava englobar todos os dados num único modelo de previsão para os 3 dias, a rede neuronal apresentava um comportamento medíocre, seja ao nível do treino da rede ou ao nível da saída.

Por observação do esquema, pode-se ver que são utilizados valores passados e futuros do preço de electricidade, sendo que se constatou, após vários testes, que esta metodologia produzia resultados melhores ao se incorporarem esses mesmos valores de  $P_{Ele}$  passados e futuros. Estes testes realçam ainda mais a não-linearidade dos preços do carbono, visto que a reacção destes aos preços de electricidade não é sempre a mesma, sendo preciso um intervalo que é relativamente extenso de  $P_{Ele}$  de forma a obter-se um modelo de previsão eficiente.

É preciso ter em conta, como já referido, que os  $P_{Ele}$  futuros têm também que ser previstos. Com base na pesquisa feita em relação a previsão de preços em mercado de electricidade, foi possível constatar que existem já metodologias que permitem uma previsão num horizonte de 7 dias, que aliás foi já referida no capítulo 2. Abaixo representa-se essa metodologia, nomeadamente as variáveis que são consideradas. Esta metodologia encontra-se explicada detalhadamente no capítulo 2.

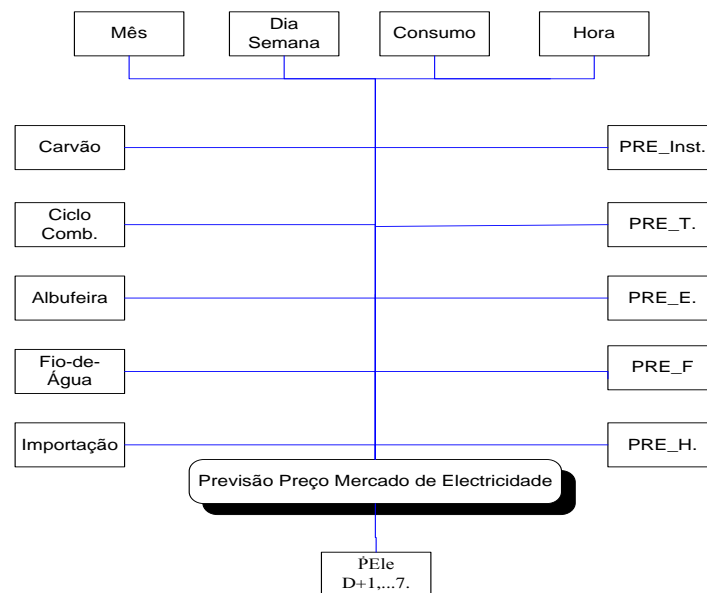


Figura 4.4-Modelo de Previsão de Preços de Electricidade.

Tendo em conta os objectivos da investigação inerente a esta dissertação, convém referir que apesar de se descrever uma metodologia para previsão dos preços de electricidade, tal previsão não foi testada no âmbito do desenvolvimento de um modelo de previsão dos preços em mercado de carbono. É feita então a assunção de que se conseguem prever os preços de electricidade na Alemanha, sendo que os testes realizados dizem respeito a intervalos de tempo para os quais já se têm todos os valores de variáveis necessários. Todavia, de forma a simular o erro inerente à previsão do preço de electricidade, com recurso à formulação disponível no software Microsoft Excel, introduziu-se com um erro aleatório de distribuição normal, que varia entre 10% e 20% conforme o horizonte de previsão. Ou seja o  $P_{Ele}$  simulado é resultado da fórmula:  $P_{Ele} + \varepsilon$ . Onde  $\varepsilon$  representa o resíduo.

Em relação à variável de entrada  $P_{EU(A)(D)}$ , pode-se dizer que se confirma pelos testes feitos ao modelo a alta influência de valores passados na melhoria dos resultados da previsão, o que vem no seguimento dos resultados dos testes de auto-correlação e auto-correlação parcial que estão expostos no capítulo 3.

Observando a figura [4.5], percebe-se melhor o que muda para cada um dos três modelos, ao nível de informação utilizada.

Suponha-se que estamos localizados no dia 18-05-2010 e pretendemos prever para o dia 19(D+1), 20(D+2), ou 21(D+3). Os dados a utilizar serão:

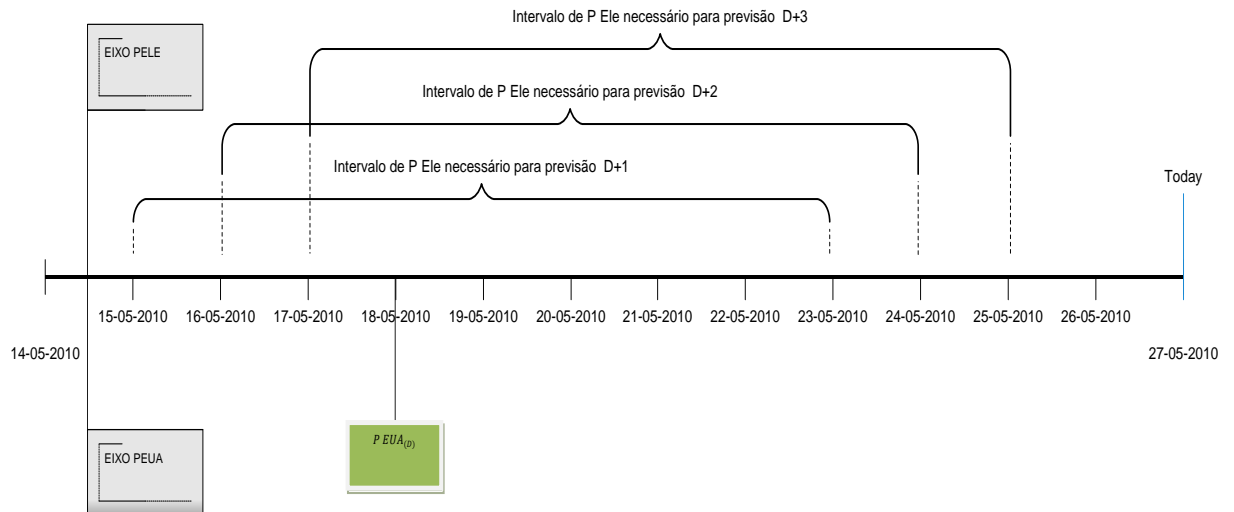


Figura 4.5-Intervalos de Dados Usados na Previsão

### 4.3 - Conjunto de Treino

Como já foi referido no capítulo 3, os preços das EUAs em 2010, caracterizam-se por uma maior estabilidade, observe-se a figura (4.6), onde se pode ver que até Abril os preços se mantiveram entre 12€ e 14€. Todavia, a não-linearidade é uma característica inerente à relação Preço de Electricidade e Preço das EUAs. Como tal, para ultrapassar essa dificuldade, optou-se por escolher um conjunto de treino que fosse imediatamente antecessor do dia em que se pretende prever o  $P_{EUA}$ . Para além disso, aquando do período de teste do modelo constatou-se que o melhor conjunto de treino era composto pelos dados correspondentes aos 5 dias anteriores do dia de previsão. Desta maneira, foi possível captar com mais eficácia a influência que  $P_{Ele}$  tinha em  $P_{EUA}$  durante o período de tempo para o qual se pretende prever.

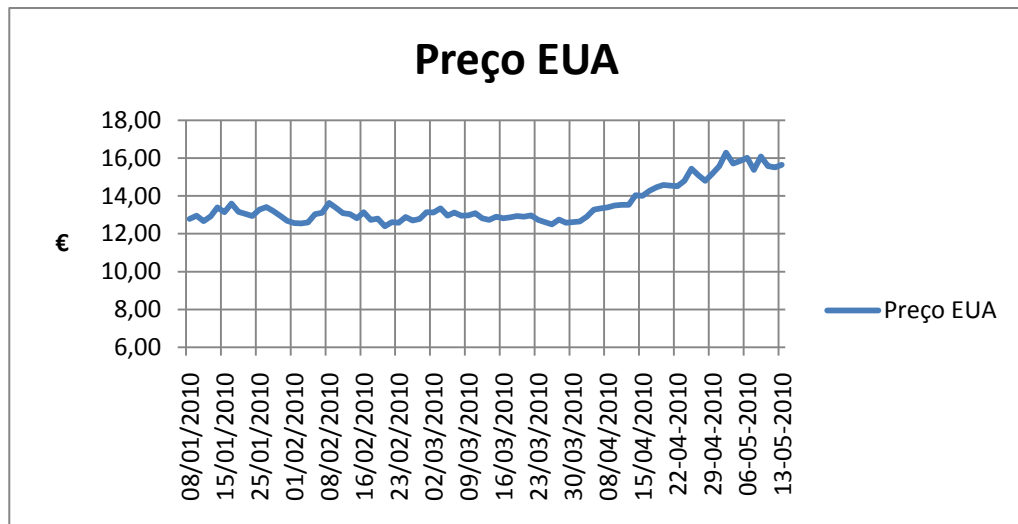


Figura 4.6-Preço EUA em 2010.

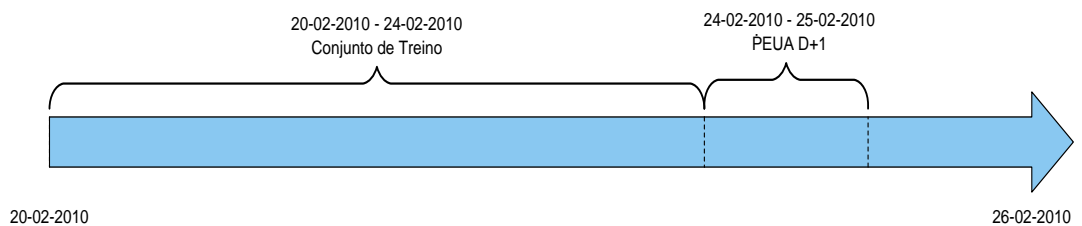


Figura 4.7-Amplitude do Conjunto de Treino

Abaixo, na figura [4.8], expõem-se os dias para os quais se precisa de se saber valores, seja de  $P_{EUA}$ , seja de  $P_{Ele}$ , de maneira a que se possa fazer uma previsão, que neste caso, é para o dia seguinte, o dia 15 de um determinado mês.

Dia	Entrada										Saída
	PEUA D	PEle D-3	PEle D-2	PEle D-1	PEle D	PEle D+1	PEle D+2	PEle D+3	PEle D+4	PEle D+5	PEUA D+1
9	9	6	7	8	9	10	11	12	13	14	10
10	10	7	8	9	10	11	12	13	14	15	11
11	11	8	9	10	11	12	13	14	15	16	12
12	12	9	10	11	12	13	14	15	16	17	13
13	13	10	11	12	13	14	15	16	17	18	14
14	14	11	12	13	14	15	16	17	18	19	PEUA -15

Figura 4.8-Exemplo de conjunto de treino para previsão para o dia seguinte.

A título de exemplo, olhando para o conjunto de treino, que vai desde o dia 9 até ao dia 13:

-No dia 9, para a variável  $P_{EUA(D)}$ , precisa-se do valor de  $P_{EUA}$  verificado no dia 9. Por sua vez para  $P_{Ele(D-3)}$  vamos buscar o valor do preço de electricidade verificado no dia 6.

-Para o dia 12, como  $P_{Ele(D+5)}$  corresponde ao valor do preço de electricidade no dia 16, este já vai ter que ser previsto.

#### 4.4 - Configuração da Rede Neuronal

A configuração ideal de uma Rede Neuronal, é difícil de encontrar. Como tal, a escolha dos parâmetros da Rede foi escolhida, seguindo-se um processo de “tentativa e erro”.

O tipo de rede utilizado foi o feedforward, que funciona de uma forma progressiva, sem realimentação. Devido à sua representação em camadas, são designadas por redes de camadas, como as MLP. Sendo que este tipo de redes têm uma vasta utilização em aplicações de previsão.

O método de aprendizagem escolhido foi backpropagation, sendo que este é o método de aprendizagem supervisionada mais utilizado. Consiste num algoritmo que generaliza a aplicação do método dos mínimos quadrados a Redes Neurais com mais de duas camadas e que implementa o sistema de cálculo sucessivo das derivadas parciais numa direcção contrária à da normal propagação da informação através da rede.

O número de neurónios, foi escolhido seguindo a regra,  $2n+1$ , onde  $n$  representa o número de variáveis de entradas na rede neuronal, neste caso, como se tem 10 entradas, o número de neurónios escolhido foi 21.

Em relação ao número de camadas da rede neuronal, após vários testes, verificou-se que a Rede Neuronal respondia melhor utilizando duas camadas.

#### 4.5 - Avaliação do Modelo

A melhor maneira de avaliar os resultados de um modelo de previsão consiste simplesmente em observar gráficos com os valores reais da variável dependente e os valores previstos para esta, para os instantes em questão.

Todavia, há um conjunto de ferramentas de avaliação dos modelos de avaliação, para que se possa inferir sobre a qualidade destes.

Durante a investigação inerente à criação do modelo de previsão de preços em mercado de carbono, utilizou-se como medida de erro o MAPE (Mean absolute percentage error) (eq. [4.1]):

$$MAPE_k = Y \frac{1}{N} \frac{\sum |e_t + k|t|}{Y_{med}} \times 100 \tag{4.1}$$

Onde,

$Y_{med}$  representa o valor médio para o conjunto de dados a tratar.

$$e_{d+k|d} = Y_{d+k} - \hat{Y}_{d+k|d} \tag{4.2}$$

$Y_{d+k}$ -Valor Real

$\hat{Y}_{d+k|d}$ -Valor previsto

Esta ferramenta é considerada uma boa maneira de verificar a qualidade do modelo de previsão, sendo que os resultados exibidos em percentagem proporcionam uma fácil interpretação, comparativamente com outros métodos de medição de erro, onde os resultados são obtidos em valores absolutos.

### 4.6 - Resultados

Abaixo representam-se os resultados dos três modelos para um conjunto de teste seleccionado aleatoriamente ao longo do primeiro semestre de 2010. Convém realçar o facto de que a melhor maneira de avaliar um modelo de previsão é indubitavelmente a observação gráfica, simultânea, das séries “Valores Reais” e “Valores Previstos”, de maneira a que melhor se determine se estamos perante modelos de previsão que fornecem resultados fiáveis e que a série “Valores Previstos” acompanha bem as tendências da série “Valores Reais”.

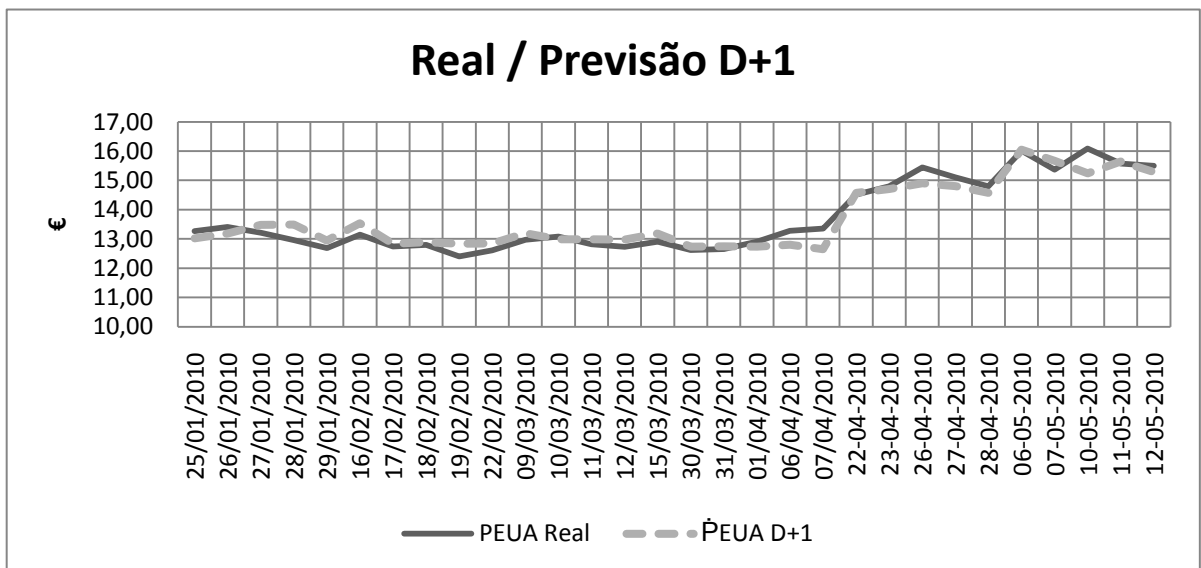


Figura 4.9 -Real/Previsto-Previsão para D+1

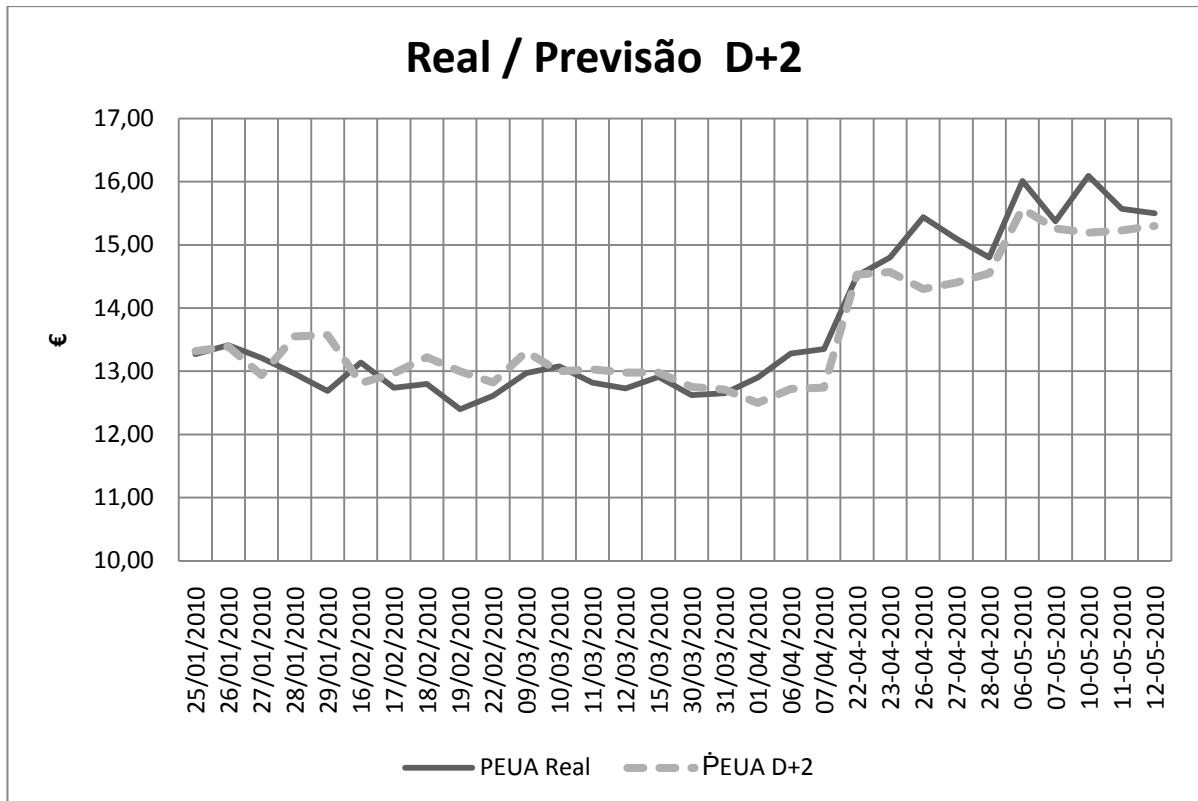


Figura 4.10- Real/Previsto-Previsão para D+2

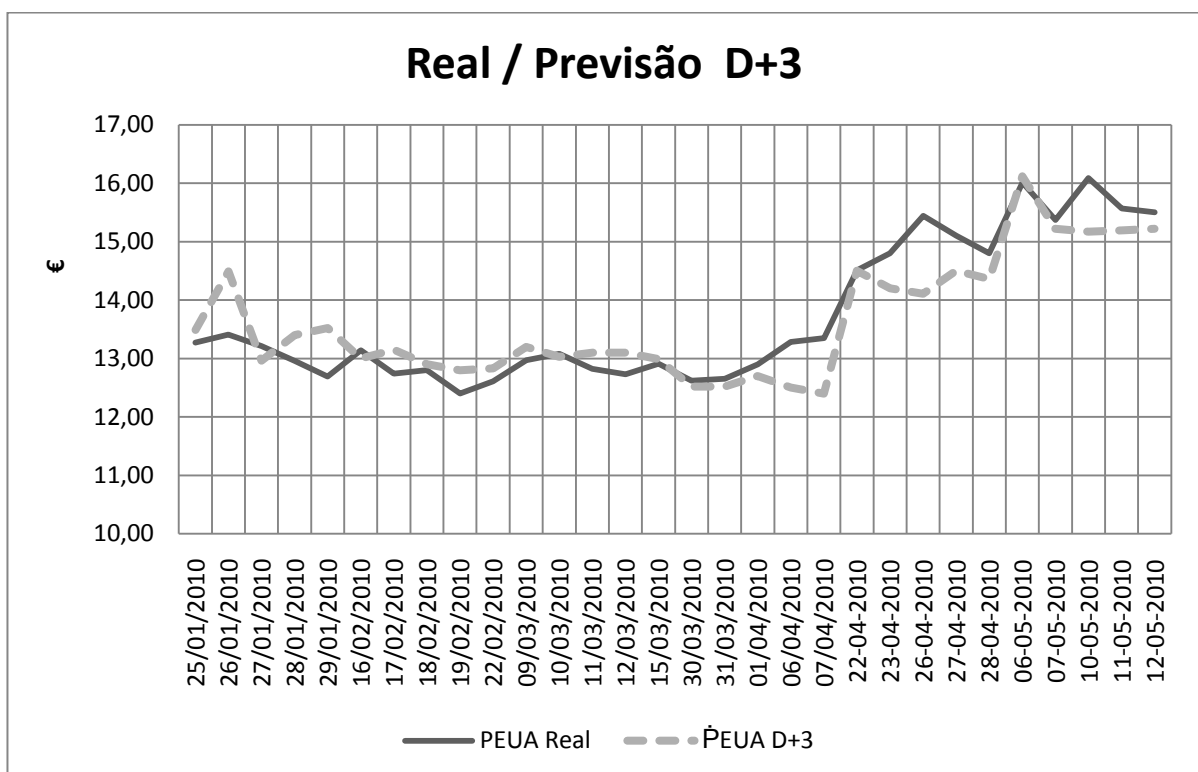


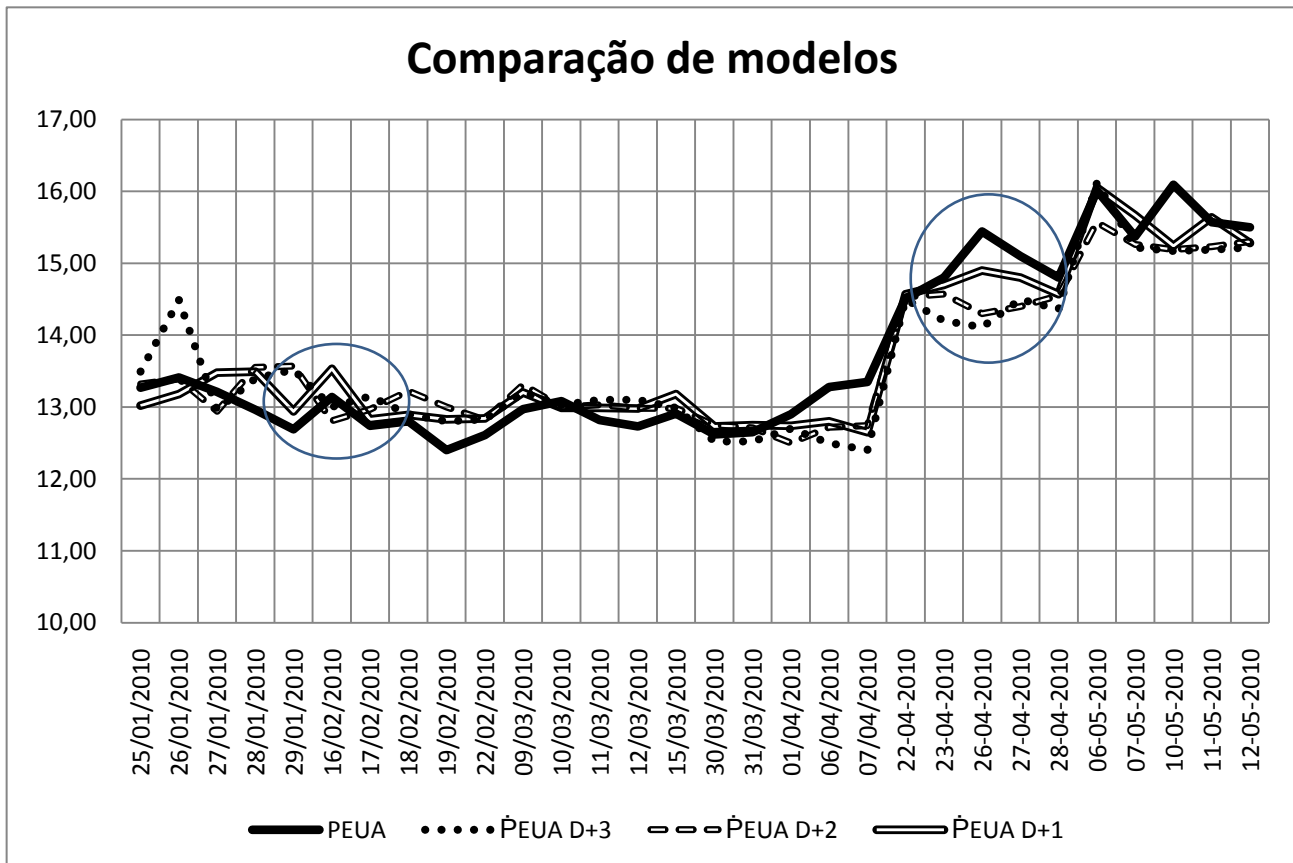
Figura 4.11-Real/Previsto-Previsão para D+3

Por observação das figuras [4.11,4.10 e 4.9] podemos afirmar que estamos perante um modelo de previsão eficaz, com boa capacidade de previsão mesmo em situações de maior volatilidade de preços como começou a acontecer a partir de Abril de 2010. Para cada um dos horizontes de previsão, o modelo apresenta respostas muito parecidas, não obstante, é visível que a previsão para o dia seguinte é a que melhor acompanha os valores reais de *P EUA*, ver figura [4.12].

Tabela 4.1-Erro MAPE

	Previsão (MAPE %)	Persistência(MAPE %)	Melhoria Em Relação à Persistência(%)
D+1	1.95	2.59	24.71
D+2	2.58	3	14.00
D+3	2.93	3.2	8.4

Analisando o MAPE (tabela [4.1]) associado a cada previsão, confirma-se que a previsão para o dia seguinte é indubitavelmente a que produz melhores resultados. Era de esperar que tal acontecesse, visto que se faz a introdução de erro nas previsões de preço de electricidade. Como à medida que se aumenta o horizonte de previsão do preço do carbono, se torna necessário prever mais valores de preço de electricidade, o aumento do erro inerente à previsão de electricidade repercute-se no erro da previsão do preço do carbono. Mais ainda comparando os resultados dos três modelos de previsão com a Persistência dos valores dos preços das EUAs, sai reforçada a ideia que estamos perante uma robusta metodologia, onde se evidencia a melhoria, em relação à persistência, da previsão para o dia seguinte. Durante os testes do modelo testou-se também um modelo com o objectivo de fazer uma previsão para D+4, todavia devido à perda de informação com o aumento do erro inerente à previsão do preço de electricidade, verificou-se que os resultados eram de menor qualidade e a Rede Neuronal apresentava comportamentos medíocres ao nível da fase de treino. Tem também que se ter em conta o horizonte máximo de previsão de preço de electricidade é de sete dias, o que impossibilita o modelo criado de prever para D+4.



4.12-Comparação de Modelos

Observando a figura (4.12), torna-se ainda mais evidente a superior eficácia do modelo para previsão para o dia seguinte. De facto para as zonas assinaladas do gráfico é possível ver que ao nível do acompanhamento das subidas e descidas do preço das licenças de emissão, a previsão para D+1 apresenta-se caracterizada de uma grande fiabilidade. Conclui-se também que com o aumento do erro das variáveis de entradas nas previsões para D+2 e D+3, deteriora-se também de forma significativa o preço previsto das EUAs, o dia onde tal discrepância é mais visível é em 26 de Janeiro de 2010.

# Capítulo 5

## Conclusão

### 5.1 - Conclusões Finais

O CELE entrou em funcionamento há cinco anos. É pois plausível afirmar que estamos perante um mercado ainda em desenvolvimento. Como consequência dessa imaturidade do mercado, até 2009, a volatilidade foi a característica principal da série de preços das EUAs, onde pudemos verificar uma mudança de variáveis explicadoras ao longo destes cinco anos, mudança que denuncia um processo de aprendizagem por parte dos participantes que negociam as licenças de emissão. Mais ainda, desde a entrada em vigor do CELE verificou-se que os drivers principais assentavam nos preços do petróleo, mercados de acções e preços de electricidade, que por sua vez são também “commodities” cuja variação de preços é também caracterizada por grande volatilidade, contribuindo para a instabilidade dos preços do carbono. Convém também ter em mente que as decisões políticas desempenham aqui um papel importante. Ficou bem patente a influência no mercado por parte NAPs e o quanto a distribuição inicial de EUAs conjugada com os relatórios de emissões influem nos preços do carbono. De facto, mesmo ao nível da legislação há ainda propostas que estão na mesa de negociações que poderão influenciar de forma determinante o comportamento dos preços no futuro. A aprovação de propostas como a permissão de “banking” de EUAs entre diferentes períodos de cumprimento, terá com certeza um papel determinante na definição de estratégias por parte dos players no CELE. Como tal, é arriscado inferir sobre a eficácia ao longo do tempo de um modelo de previsão de preços das licenças de emissão.

No primeiro semestre de 2010, a série de preços de EUAs apresentou um comportamento mais estável, onde o Preço da Electricidade na Alemanha e os NAPs surgem como principais influências encontradas. Esta estabilidade permitiu a criação de um modelo de previsão desdobrável em três, conforme o horizonte de previsão pretendido, um, dois ou três dias. Tendo em conta o objectivo principal desta dissertação a previsão a curto e médio prazo de preços de carbono, os resultados possíveis apenas concernem à previsão a curto prazo. Não

obstante, convém lembrar que, pelos testes feitos, a previsão de preços de carbono está intimamente ligada à previsão de preços de electricidade, que por sua vez também está limitada a um horizonte de sete dias. Mais ainda tendo em conta os resultados pouco claros doutras investigações similares, assim como uma pesquisa de mercado, conclui-se que o modelo criado, aquando da investigação inerente a esta dissertação, surge como o primeiro modelo de previsão de preços em mercado de carbono que permite resultados fiáveis e de robustez suficiente mesmo em períodos de maior variabilidade de preços, como se verificou em Abril de 2010. Ao nível da definição de conjuntos de treino, verificou-se que a magnitude destes deve ser de 5 dias apenas para que se capture melhor a real influência dos Preços de Electricidade no mercado de carbono, na altura para a qual se pretende prever o preço das EUAs. Convém realçar o facto de que as Redes Neurais surgem mais uma vez, no âmbito da previsão, como uma ferramenta importante, de fácil aplicação e com bons resultados, nomeadamente ao nível da captação de não-linearidades de séries temporais. Analisando a aplicabilidade prática deste modelo a um nível empresarial, convém recordar que este modelo depende de acesso à informação necessária para a previsão dos preços de electricidade na Alemanha.

Dum ponto de vista global, esta dissertação surge como uma contribuição importante para os estudos que envolvem o recente CELE, não só pelo produto final que é apresentado, mas também pela investigação inédita que é feita ao nível dos factores que influenciaram o comportamento do mercado de carbono em 2009 e 2010.

## 5.2 - Investigações Futuras

Em relação a investigações futuras passíveis de ter utilidade no que concerne à previsão de preços das EUAs, surge logo em primeiro lugar a necessidade de estudos com o objectivo de alargar o horizonte de previsão de preços de electricidade, visto que só desta forma se conseguirá alargar o horizonte de modelos de previsão de preços de licenças de emissão.

Num futuro próximo, principalmente no início do 3º período de cumprimento do CELE, já que se prevê algumas alterações às regras de funcionamento deste mercado, será interessante estudar o impacto que as decisões políticas têm nas negociações das EUAs.

Convém também reforçar a ideia que o CELE é ainda bastante recente e passível de ser instável, como tal a repetição de trabalhos como este serão necessários mais tarde, para que se obtenham modelos até mais fiáveis e com horizontes de previsão mais alargados. Todavia é plausível afirmar que o caminho das investigações será sempre o da associação do CELE aos mercados de Electricidade.

Ao nível da previsão a longo prazo de preços das licenças de emissão, pode-se dizer que esta será sempre difícil de se fazer, já que variáveis como a actividade económica e preços de petróleo terão nesta variante de previsão uma influência mais preponderante que a curto prazo. A previsão deste tipo de variáveis como se sabe é extremamente difícil de ser feita,

não obstante, sob o estabelecimento de cenários, poder-se-á inferir sobre preços médios à volta dos quais as EUAs vão sondar nos próximos anos.



## Referências

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em <http://www.unfccc.int> Acesso em 1/Junho/2010
- [2] Climate Change Secretariat, “Caring for Climate: a guide to Climate Change Convention and the Kyoto Protocol”, 2005.
- [3] Kyoto Protocol base year data. Disponível em [http://unfccc.int/ghg\\_data/kp\\_data\\_unfccc/base\\_year\\_data/items/4354.php](http://unfccc.int/ghg_data/kp_data_unfccc/base_year_data/items/4354.php). Acesso a 20/Maio/2010.
- [4] Ministry of Environment of Republic of Korea: Air and Climate Change. Disponível em <http://eng.me.go.kr>. Acesso a 1/Junho/2010.
- [5] Ackerman, F. and W. Moomaw, *SO2 emissions trading: does it work?* The Electricity Journal, 1997**10**(7): p. 61-66.
- [6] Ricardo Moita, “Concretização do Protocolo de Quioto: Os Acordos de Marraquexe e suas implicações para a estratégia nacional de combate às alterações climáticas.”2004.
- [7] Emissions Trading. Disponível em [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/mechanisms/emissions\\_trading/items/2731.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/emissions_trading/items/2731.php). Acesso a 2/Maio/2010.
- [8] A. Denny Ellerman, Frank J. Convery. Pricing Carbon: “The European Union Emissions Trading Scheme”. 2010.
- [9] Emissions Trading Scheme, disponível em [http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/index_en.htm). Acesso a 20/Abri/2010.
- [10] <http://www.ionline.pt/adjuntos/102/imagenes/000/107/0000107702.jpg>. Acesso a 1/Junho/2010.
- [11] Rezek, J., *Shadow Prices Of Sulfur Dioxide Allowance In Phase I Electric Utilities*. 1999, American Agricultural Economics Association (New Name 2008: Agricultural and Applied Economics Association).
- [12] Schennach, S.M., *The Economics of Pollution Permit Banking in the Context of Title IV of the 1990 Clean Air Act Amendments*. Journal of Environmental Economics and Management, 2000. **40**(3): p. 189-210.
- [13] Makridakis, S., *Time series prediction: Forecasting the future and understanding the past* : Andreas S. Weigend and Neil A. Gershenfeld, eds., 1993, (Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, USA), 643 pp., paperback \$49.50, ISBN 0-201-62. International Journal of Forecasting, 1994. **10**(3): p. 463-466.
- [14] Ye, M., J. Zyren, and J. Shore, *A monthly crude oil spot price forecasting model using relative inventories*. International Journal of Forecasting. **21**(3): p. 491-501.
- [15] Yu, L., S. Wang, and K.K. Lai, *Forecasting crude oil price with an EMD-based neural network ensemble learning paradigm*. Energy Economics, 2008. **30**(5): p. 2623-2635.
- [16] Morana, C., *A semiparametric approach to short-term oil price forecasting*. Energy Economics, 2001. **23**(3): p. 325-338.
- [17] Mohammadi, H. and L. Su, *International evidence on crude oil price dynamics: Applications of ARIMA-GARCH models*. Energy Economics. In Press, Corrected Proof.

- [18] Kaboudan, M.A. and R. Neck, *Short-Term Compumetric Forecast of Crude Oil Prices*, in *Modeling and Control of Economic Systems 2001*. 2003, Elsevier Science Ltd: Oxford. p. 365-370.
- [19] Catalão, J.P.S., et al., *Short-term electricity prices forecasting in a competitive market: A neural network approach*. *Electric Power Systems Research*, 2007. **77**(10): p. 1297-1304.
- [20] Gareta, R., L.M. Romeo, and A. Gil, *Forecasting of electricity prices with neural networks*. *Energy Conversion and Management*, 2006. **47**(13-14): p. 1770-1778.
- [21] José Coimbra. *Previsão a curto prazo de preços em Mercado de electricidade*. 2010.
- [22] Mansanet-Bataller, M. and P. Soriano. *Volatility transmission in the CO2 and energy markets*. in *Energy Market, 2009. EEM 2009. 6th International Conference on the European*. 2009.
- [23] Bluenext. Disponível em [www.Bluenext.fr](http://www.Bluenext.fr)- Acesso a 5/Junho/2010.
- [24] Alberola, E., J. Chevallier, and B. Chèze, *Price drivers and structural breaks in European carbon prices 2005-2007*. *Energy Policy*, 2008. **36**(2): p. 787-797.
- [25] Beat Hintermann, B., *Allowance price drivers in the first phase of the EU ETS*. *Journal of Environmental Economics and Management*. **59**(1): p. 43-56.
- [26] Alberola, E., J. Chevallier, and B. Chèze, *Emissions Compliances and Carbon Prices under the EU ETS: A Country Specific Analysis of Industrial Sectors*. *Journal of Policy Modeling*. **31**(3): p. 446-462.
- [27] Poily Energy Consulting. Disponível em [http://www.ilxenergy.com/?t=8\\_1Fuel](http://www.ilxenergy.com/?t=8_1Fuel). Acesso em 4/Maio/2010.
- [28] Keppler, J.H. and M. Mansanet-Bataller, *Causalities between CO2, electricity, and other energy variables during phase I and phase II of the EU ETS*. *Energy Policy*. **38**(7): p. 3329-3341.
- [29] Mansanet Bataller, Maria, Pardo Tornero, Ángel and Valor, Enric, *CO2 Prices, Energy and Weather*. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=913964>
- [30] Mansanet-Bataller, M. and A.n. Pardo, *What You Should Know About Carbon Markets*. *Energies*, 2008. **1**(3): p. 120-153.
- [31] Benz, E. and S. Trück, *Modeling the price dynamics of CO2 emission allowances*. *Energy Economics*, 2009. **31**(1): p. 4-15.
- [32] Engle, R.F., *Autoregressive Conditional Heteroscedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation*. *Econometrica*, 1982. **50**(4): p. 987-1007.
- [33] Bollerslev, Tim (1986). "Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity". *Journal of Econometrics* **31** (3): 307-327.
- [34] Mori, H. and W. Jiang. *A risk analysis method for carbon price prediction with hybrid intelligent model in consideration of variable selection of graphical modeling*. in *Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on*. 2008.
- [35] Paul, E., M.C. Frunza, and D. Guegan. *Derivative Pricing and Hedging on Carbon Market*. in *Computer Technology and Development, 2009. ICCTD '09. International Conference on*. 2009.
- [36] Seifert, J., M. Uhrig-Homburg, and M. Wagner, *Dynamic behavior of CO2 spot prices*. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2008. **56**(2): p. 180-194.
- [37] Daskalakis, G., D. Psychoyios, and R.N. Markellos, *Modeling CO2 emission allowance prices and derivatives: Evidence from the European trading scheme*. *Journal of Banking & Finance*, 2009. **33**(7): p. 1230-1241.
- [38] Rose, K., *Deterministic annealing for clustering, compression, classification, regression, and related optimization problems*. *Proceedings of the IEEE*, 1998. **86**(11): p. 2210-2239.
- [39] R.Sharda. "Neural Networks for the MS/OR analyst: An application bibliography". 1994
- [40] Srinivasan, D., A.C. Liew, and C.S. Chang, *A neural network short-term load forecaster*. *Electric Power Systems Research*, 1994. **28**(3): p. 227-234.
- [41] Zhang, G., B. Eddy Patuwo, and M. Y. Hu, *Forecasting with artificial neural networks:: The state of the art*. *International Journal of Forecasting*, 1998. **14**(1): p. 35-62.
- [42] [www.scielo.br/img/revistas/rem/v58n3/11f2.gif](http://www.scielo.br/img/revistas/rem/v58n3/11f2.gif), Acesso a 5/Junho/2010

- [43] CITL. Disponível em [http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/citl\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/emission/citl_en.htm). Acesso a 26/Maio/2010.
- [44] Bluenext. Disponível em [www.bluenext.fr](http://www.bluenext.fr). Acesso a 27/Junho/2010.
- [45] EXAA. Disponível em [www.exaa.at](http://www.exaa.at). Acesso a 27/Junho/2010.
- [46] Euronext 100. Disponível em [www.euroinvestor.co.uk](http://www.euroinvestor.co.uk). Acesso a 27/Junho/2010.
- [47] Preço Petróleo Brent. Disponível em [www.eia.doe.gov/dnav/pet](http://www.eia.doe.gov/dnav/pet). Acesso a 27/Junho/2010.
- [48] Nordpool. Disponível em <http://www.nordpoolspot.com/>. Acesso a 27/Junho/2010.
- [49] Powernext Gas. Disponível em [www.powernext.com](http://www.powernext.com). Acesso a 27/Junho/2010.
- [50] Eurostat. Disponível em [epp.eurostat.ec.europa.eu](http://epp.eurostat.ec.europa.eu). Acesso a 27/Junho/2010.
- [51] Elsa Ferraz. *Optimização de Estruturas e Modelos de Previsão de Produção Mini-Hídrica*.2010.



# Apêndice: Variáveis Analisadas

## 6.1-Preço do Gás Natural

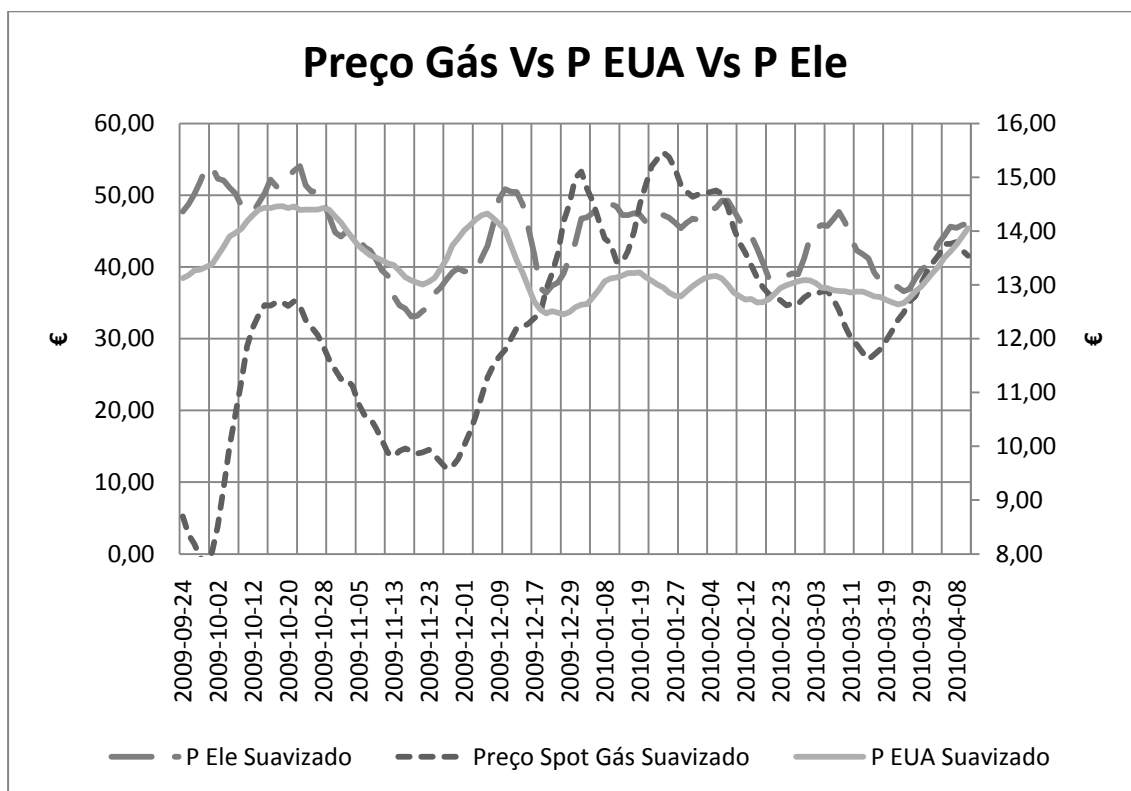


Figura 6.1-Preço Gás Vs P EUA Vs P Ele

O gás natural é um dos combustíveis mais usados na produção de energia eléctrica, sendo as centrais térmicas a parte com mais significância no CELE, é natural que haja co-linearidade entre o preço do gás natural, preço da electricidade e preço das licenças de emissão. Todavia convém ter em conta que num modelo de previsão a co-linearidade entre variáveis de entrada tem que ser evitada. Observando a figura [6.1], é perceptível a correlação entre três variáveis, principalmente até fins de Novembro de 2009, não obstante, o preço da electricidade na Alemanha, apresenta-se mais uma vez como o “driver” que melhor explica as variações de P EUA. De facto, os preços do gás natural são muito

condicionados pelos preços do Petróleo, de tal forma que é mais plausível considerar em primeiro lugar o estudo da correlação entre petróleo e EUAs, do que qualquer outro combustível fóssil.

## 6.2-Preço Electricidade Nordpool Vs Preço EUA

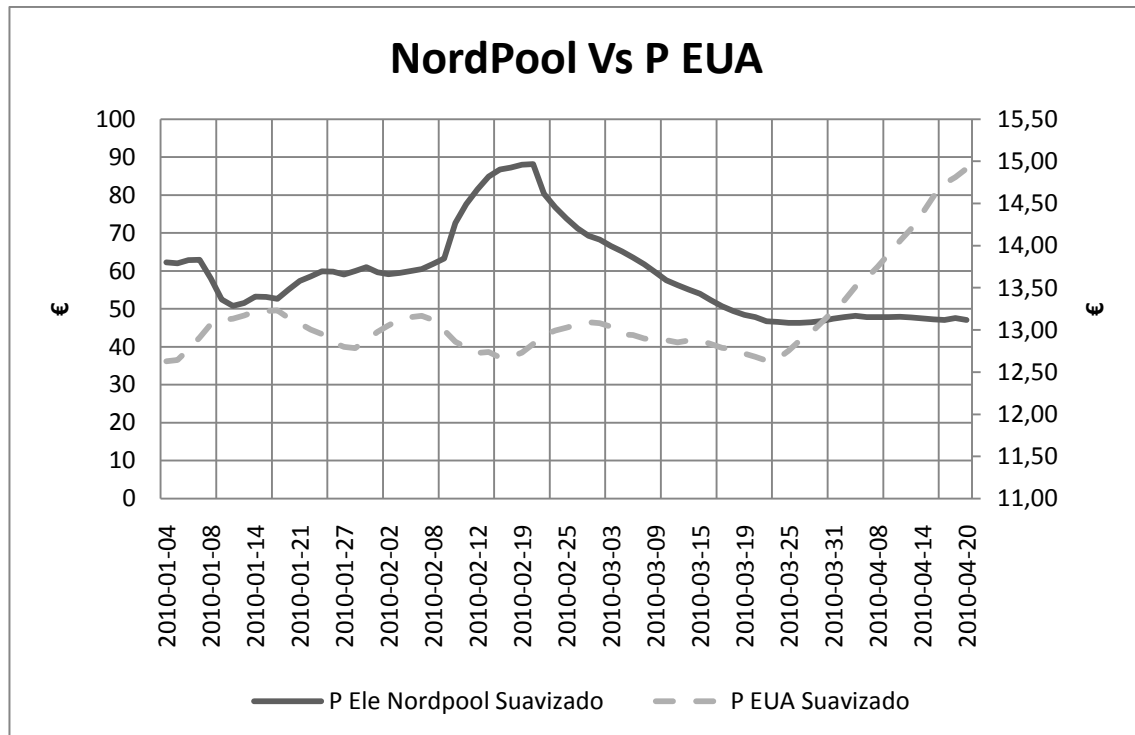


Figura 6. 2-Nordpool Vs P EUA

No Nordpool negociam a Suécia, Finlândia, Dinamarca e Noruega. Todavia estes quatro países representam apenas 5% ([43]) de todas as EUAs atribuídas no âmbito do CELE, como tal a influência deste conjunto de países na variação dos preços do carbono é, como se pode verificar pela figura [6.2], imperceptível.