

# MODELO DE CONTROLO DIFUSO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA COM BASE EM RECURSOS RENOVÁVEIS

Miguel Luís de Babo Moreira



Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2014**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Candidato: Miguel Luís de Babo Moreira, Nº 1020386, 1020386@isep.ipp.pt

Orientação científica: Isabel Maria de Sousa de Jesus, isj@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2014**



## *Agradecimentos*

Quero deixar aqui os meus agradecimentos às pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Deixo o meu sincero agradecimento à Dr.<sup>a</sup> Isabel Jesus, não só pela disponibilidade inexcedível sempre prestada no decorrer da elaboração da tese, como também pela orientação e aconselhamento dados.

Agradeço a todos aqueles que mesmo em horas de desalento, me deram ânimo sempre que necessário, para que pudesse continuar os meus objetivos.



## *Resumo*

A satisfação das necessidades energéticas mundiais, cada vez mais exigentes, bem como a necessidade urgente de procurar caminhos que permitam usufruir de energia, da forma menos poluente possível, levam à necessidade de serem explorados caminhos que permitam cumprir estes pressupostos.

A escolha da utilização das energias renováveis na produção de energia, torna-se cada vez mais interessante, quer do ponto de vista ambiental quer económico.

O fundamento da lógica difusa está associado à recolha de informações vagas, que são no fundo uma linguagem falada por seres humanos, possibilitando a passagem deste tipo de linguagem para formato numérico, permitindo assim uma manipulação computacional.

Elementos climáticos como o sol e o vento, podem ser descritos em forma de variáveis linguísticas, como é o caso de vento forte, temperatura baixa, irradiação fraca, etc. Isto faz com que a aplicação de um controlo a partir destes fenómenos, justifique ser realizado com recurso a sistemas de inferência difusa.

Para a realização do trabalho proposto, foram consumados estudos relativos às energias renováveis, com particular enfoque na solar e na eólica. Também foi realizado um estudo dos conceitos pertencentes à lógica difusa e a sistemas de inferência difusa com o objetivo de perceber os diversos parâmetros constituintes desta matéria.

Foi realizado o estudo e desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados, bem como do controlador difuso que é o busílis do trabalho descrito neste relatório. Para tal, o trabalho foi efetuado com o recurso ao *software* MATLAB, a partir do qual foram desenvolvidas aplicações que possibilitaram a obtenção de dados climáticos, com vista à sua utilização na *toolbox Fuzzy Logic* a qual foi utilizada para o desenvolvimento de todo o algoritmo de controlo.

Com a possibilidade de aquisição de dados concluída e das variáveis que iriam ser necessárias definidas, foi implementado o controlador difuso que foi sendo sintonizado ao longo do trabalho por forma a garantir os melhores resultados possíveis.

Com o recurso à ferramenta Guide, também do MATLAB, foi criada a *interface* do sistema com o utilizador, sendo possível a averiguação da energia a ser produzida, bem como das contribuições de cada uma das fontes de energia renováveis para a obtenção dessa mesma energia.

Por último, foi feita uma análise de resultados através da comparação entre os valores reais esperados e os valores obtidos pelo controlador difuso, bem como assinaladas conclusões e possibilidades de desenvolvimentos futuros deste trabalho.

### ***Palavras-Chave***

Energias renováveis, Energia Solar, Energia Eólica, Sistemas Híbridos, Sistemas Autónomos, Controlo Difuso.

## *Abstract*

The increasingly demanding of global energy needs and the imperative need to come across ways to make use of energy by the least polluting way possible, lead to the need to explore ways that accomplish these assumptions.

The energy production from renewable manner becomes increasingly attractive, not only from an environmental standpoint but also from economically.

The foundation of fuzzy logic is associated with the assortment of information spaces, which are a spoken language by humans, allowing the passage of this type of language to numeric format for computer manipulation.

Elements such as climacteric like the sun and the wind, can be described in the form of linguistic variables, as is the case of strong wind, low temperature, weak radiation, etc. This essentials can provide control applications using inference of fuzzy systems.

For carrying out the proposed work, research on renewable, with particular focus on solar and wind were consummated. A study of the concepts belonging to the fuzzy logic and fuzzy inference systems with the goal of realizing the various ground rules of this material parameters.

The work has been developed using MATLAB software, from which applications have been developed to enable the obtaining weather data and to develop work through Fuzzy Logic toolbox.

The study and development of a system for data acquisition was performed, and the fuzzy controller which is the core of the work described.

With the possibility of acquiring complete data and also the variables that would be needed to set, the fuzzy controller was getting tuned throughout the work to ensure the best implementation possible of results.

Using the Guide Tool, also from MATLAB, was created the system interface with the user, as well, performed the investigation of the energy produced, and the contributions of each of renewable energy sources obtained.

At last, an analysis of the results was made by comparison of the expected real values and the values obtained by the fuzzy controller, as well as conclusions and possibilities for future developments of this work.

***Keywords***

Renewable Energies, Solar Energy, Wind Energy, Hybrid Systems, Autonomous systems, Fuzzy Control.

Índice	
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XV</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS .....	1
1.3.CALENDARIZAÇÃO.....	2
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	2
<b>2. GÉNESE: ENERGIAS RENOVÁVEIS</b> .....	<b>5</b>
2.1.EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS MUNDIAIS .....	5
2.2.ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	8
2.3.ENERGIA EÓLICA.....	25
2.4.ENERGIA SOLAR .....	54
2.5.SISTEMAS HÍBRIDOS .....	59
2.6.CONCLUSÕES .....	65
<b>3. LÓGICA DIFUSA</b> .....	<b>67</b>
3.1.VANTAGENS DA IMPLEMENTAÇÃO DO CONHECIMENTO DE ESPECIALISTAS .....	68
3.2.FUNDAMENTOS DA TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS.....	68
3.3.FUNÇÕES DE PERTENÇA .....	83
3.4.COLAPSO DE UM CONJUNTO DIFUSO.....	96
3.5.CONTROLO E AUTOMAÇÃO.....	100
3.6.CONTROLADORES LÓGICOS DIFUSOS.....	102
3.7.CONCLUSÕES .....	105
<b>4. SISTEMA DE CONTROLO DIFUSO COM BASE EM ENERGIAS RENOVÁVEIS</b> .....	<b>107</b>
4.1.INTRODUÇÃO .....	107
4.2.SIMULAÇÃO DIFUSA EM MATLAB.....	108
4.3.SISTEMA DE INFERÊNCIA DIFUSA (FIS) .....	109
4.4.DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR CDER .....	122
4.5.ANÁLISE MATEMÁTICA DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICO E EÓLICO .....	127

4.6.ANÁLISE DE RESULTADOS .....	133
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>143</b>
5.1.DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	144
<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO A. SISTEMAS HÍBRIDOS .....</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO B. DIMENSIONAMENTO DE UM PEQUENO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA</b>	
<b>165</b>	
5.2.SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	165
5.3.SISTEMAS EÓLICOS .....	168
5.4.BANCO DE BATERIAS .....	170
5.5.LEVANTAMENTO DAS CARGAS .....	171
<b>ANEXO C. REGRAS DIFUSAS UTILIZADAS NO CONTROLADOR DIFUSO DE ENERGIAS</b>	
<b>RENOVÁVEIS: CDER .....</b>	<b>173</b>
<b>ANEXO D. CARATERÍSTICAS DOS MÓDULOS UTILIZADOS.....</b>	<b>179</b>

## Índice de Figuras

Figura 1	Planeta Terra	9
Figura 2	Radiação Solar na Europa	10
Figura 3	Radiação solar na Europa mediterrânica e Norte de África	10
Figura 4	Carvão	12
Figura 5	Urânio	14
Figura 6	Geotérmica	16
Figura 7	Hídrica	17
Figura 8	Sol	20
Figura 9	Ondas	24
Figura 10	Vento	26
Figura 11	Turbina Darrieus	27
Figura 12	Recurso eólico na Europa Ocidental	32
Figura 13	Recurso eólico <i>offshore</i> na Europa Ocidental	33
Figura 14	O Atlas Português do vento	34
Figura 15	Escoamento perante um obstáculo	35
Figura 16	Efeito de esteira	35
Figura 17	Implantação de um parque eólico	36
Figura 18	Esquema de uma turbina eólica típica “Nordex”	38

Figura 19	Pormenor de um rotor com duas pás “DanishAssoc”	39
Figura 20	Tipos de torres eólicas	42
Figura 21	Forças atuantes na pá	43
Figura 22	Curvas de potência <i>pitch</i> (Bonus) e <i>stall</i> (NEG Micon e Nordex)	46
Figura 23	Microgeradores eólicos	47
Figura 24	Microgerador eólico Português	48
Figura 25	Pequeno aerogerador	48
Figura 26	Centro CIEMAT	50
Figura 27	Etiqueta de desempenho energético	51
Figura 28	Diversas aplicações de pequenas turbinas eólicas	52
Figura 29	Barramento CC	53
Figura 30	Curva característica de um módulo fotovoltaico	58
Figura 31	Modelo de um sistema híbrido	62
Figura 32	Elementos de um sistema híbrido (solar + eólico)	63
Figura 33	Recurso solar na Península Ibérica	63
Figura 34	Conceitos relativos aos conjuntos difusos	69
Figura 35	Representação da operação de intersecção de dois conjuntos difusos	72
Figura 36	Representação da operação de união entre dois conjuntos difusos	74
Figura 37	Representação de um conjunto difuso e do seu complemento	75
Figura 38	Função de pertença Sinusoidal	84
Figura 39	Função de pertença da diferença sinusoidal	85

Figura 40	Função de pertinência do produto sinusoidal	87
Figura 41	Função de pertinência Gaussiana	88
Figura 42	Função de pertinência de combinação Gaussiana	89
Figura 43	Função de pertinência Sino	90
Figura 44	Função de pertinência Pi	91
Figura 45	Função de pertinência S	92
Figura 46	Função de pertinência trapezoidal	93
Figura 47	Função de pertinência triangular	95
Figura 48	Função de pertinência Z	96
Figura 49	Colapso pelo centro de massa	97
Figura 50	Método do centro da soma das áreas (a) primeira função de pertinência; b) segunda função de pertinência; c) método de colapso	99
Figura 51	Colapso pela média dos máximos	100
Figura 52	Diagrama de blocos de um controlador lógico difuso	102
Figura 53	Arquitetura do sistema desenvolvido	108
Figura 54	Estrutura MATLAB	109
Figura 55	Editor FIS	110
Figura 56	Editor de funções de pertinência	111
Figura 57	Editor de regras	111
Figura 58	Método personalizado	113
Figura 59	Descrição da variável difusa de entrada TEMPERATURA	114

Figura 60	Descrição da variável difusa de entrada IRRADIANCIA	115
Figura 61	Descrição da variável difusa de entrada VENTO	116
Figura 62	Descrição da variável difusa de entrada HORASSOL	116
Figura 63	Descrição da variável difusa de saída ENERGIA	117
Figura 64	Descrição da variável difusa de saída SOLAR	118
Figura 65	Descrição da variável difusa de saída EOLICA	118
Figura 66	Regras utilizadas no controlador difuso CDER	119
Figura 67	Interface CDER	120
Figura 68	Monitorização do controlador CDER	121
Figura 69	Monitorização de parâmetros	122
Figura 70	Base de regras implementadas	123
Figura 71	Fluxograma da aquisição de dados meteorológicos	125
Figura 72	Fluxograma do encadeamento de programas aplicados	126
Figura 73	Módulo Kyocera	128
Figura 74	Gerador eólico Air Breeze	130
Figura 75	Energia devida ao painel fotovoltaico numa semana de agosto	134
Figura 76	Energia devida ao aerogerador numa semana de agosto	135
Figura 77	Energia devida ao painel fotovoltaico numa semana de novembro	136
Figura 78	Energia devida ao aerogerador numa semana de novembro	137
Figura 79	Energia devida ao painel fotovoltaico durante o mês de agosto	139
Figura 80	Energia devida ao aerogerador durante o mês de agosto	139

Figura 81	Sistemas solares domésticos	153
Figura 82	Iluminação pública	154
Figura 83	Escolas	155
Figura 84	Hospitais	156
Figura 85	Obtenção de água	159
Figura 86	Apoio a micro empresas	160
Figura 87	Desenvolvimento de micro empresas	161
Figura 88	Comunicações	162
Figura 89	Sistema híbrido doméstico	163
Figura 90	Dados técnicos do Painel Fotovoltaico	179
Figura 91	Gerador Eólico	180
Figura 92	Dados técnicos do Gerador Eólico	181



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Calendarização do projeto	2
Tabela 2	Tabela com exemplos de T-normas e S-normas	74
Tabela 3	Método centro de massa para diversos tipos de conjuntos difusos	98
Tabela 4	Características do painel fotovoltaico	127
Tabela 5	Características do gerador eólico	130
Tabela 6	Características de geradores eólicos	132
Tabela 7	Nomenclatura do geradores eólicos	132
Tabela 8	Variáveis utilizadas para o painel fotovoltaico numa semana de agosto e correspondentes valores obtidos	134
Tabela 9	Variáveis utilizadas para o aerogerador numa semana de agosto e correspondentes valores obtidos	135
Tabela 10	Variáveis utilizadas para o painel fotovoltaico numa semana de novembro e correspondentes valores obtidos	137
Tabela 11	Variáveis utilizadas para o aerogerador numa semana de novembro e correspondentes valores obtidos	138
Tabela 12	Valores obtidos para o painel fotovoltaico e para o aerogerador e correspondentes valores reais, para o mês de agosto	140
Tabela 13	Dados solarimétricos da região do Brasil de Três Marias	167
Tabela 14	Levantamento de cargas numa estação de telecomunicações	172



## *Acrónimos*

CIEMAT	– <i>Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas</i>
CME	– Conselho Mundial de Energia
CSCF	– <i>Constant speed constant frequency</i>
DEE	– Departamento de Engenharia Electrotécnica
EUA	– Estados Unidos da América
EWEC	– <i>European Wind Energy Conference</i>
IEA	– <i>International Energy Agency</i>
IEO96	– <i>International Energy Outlook 1996</i>
INETI	– Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
ISEP	– Instituto Superior de Engenharia do Porto
LNEG	– Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MEEC	– Mestrado em Engenharia Electrotécnica
NO	– Óxido Nítrico
OECD	– <i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
ONU	– Organização das Nações Unidas
PID	– Proporcional Integrativo e Derivativo
PMG	– <i>Permanent magnet generator</i>

- PV – Painel Fotovoltaico
- RFID – *Radio-Frequency IDentification*
- SO<sub>2</sub> – Dióxido de Enxofre
- SWTF – *Small Wind Test Facility*
- UE – União Europeia
- VSCF – *Variable speed constant frequency*

# 1. INTRODUÇÃO

Este relatório pretende demonstrar o trabalho que foi realizado durante a elaboração da Tese/Dissertação, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e Computadores (MEEC), do ramo de Automação e Sistemas, do Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEE), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este projeto nasceu do anseio de realizar uma tese final de curso que permitisse, para além de implementar conhecimentos adquiridos ao longo do caminho académico, explorar áreas não investigadas nesse mesmo caminho, como é o caso da lógica difusa. Por outro lado, a possibilidade de estar mais próximo do conhecimento das tecnologias emergentes que prometem não prejudicar a natureza já tão dizimada pelo homem, revelaram-se uma mais valia, e por conseguinte mais um incentivo para a realização com sucesso deste propósito.

## 1.2. OBJETIVOS

Pretende-se estabelecer um modelo de simulação de um controlador difuso que efetue o controlo de um pequeno sistema de produção de energia com base em recursos renováveis, sistema esse constituído por um painel fotovoltaico e um gerador eólico.

Para cumprir este objetivo principal, foram estabelecidas diversas etapas das quais se salientam:

- estudo dos conceitos inerentes à inferência difusa;
- investigação de projetos desenvolvidos nesta área de estudo;
- estudo da biblioteca de lógica difusa do MATLAB;
- obtenção e tratamento dos dados provenientes da Internet a serem usados no MATLAB;
- criação e implementação do controlador difuso;
- análise dos dados obtidos e comparação com os dados reais.

### 1.3. CALENDARIZAÇÃO

Exibe-se a calendarização deste projeto na tabela seguinte (Tabela 1) a qual envolve os passos fulcrais necessários à realização do trabalho e à duração inerente às suas execuções:

**Tabela 1 Calendarização do projeto**

	Novembro 2013	Dezembro 2013	Janeiro 2014	Fevereiro 2014	Março 2014	Abril 2014	Maió 2014	Junho 2014	Julho 2014	Agosto 2014	Setembro 2014	Outubro 2014	Novembro 2014
Escolha do tema do trabalho													
Pesquisa de áreas relacionadas com o trabalho													
Estudo do estado da arte													
Início da elaboração do relatório													
Estudo da toolbox fuzzy do Matlab													
Estudo do sistema de aquisição de dados													
Desenvolvimento do Controlador Difuso													
Continuação da redação do relatório													
Testes e análise do sistema													
Análise de resultados													
Finalização do relatório													

### 1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

No Capítulo 1 é feita uma breve introdução à área em que o projeto se insere, sendo feita uma contextualização e uma ligeira explanação dos principais objetivos do trabalho assim como indicada a respetiva calendarização e por fim a referência à organização do relatório. No capítulo seguinte, 2, são apresentados os principais fatores relacionados com o prelúdio relativo à área do trabalho e aos vários géneros de energias renováveis, como as energias solar e eólica. O terceiro Capítulo (3), tem a finalidade de evidenciar conceitos relacionados com a área de controlo, visto este ser um aspeto importante neste trabalho,

assim como diversos tipos de controlo, entre os quais se enquadra o controlo lógico difuso. No Capítulo 4, é explorada a biblioteca de controlo difuso do *MatLab*, sendo também apresentados os resultados obtidos no trabalho desenvolvido. No quinto Capítulo (5), são apresentadas as conclusões mais relevantes para o trabalho realizado e também indicadas algumas sugestões para a melhoria do trabalho realizado.



## 2. GÉNESE: ENERGIAS RENOVÁVEIS

### 2.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA DAS NECESSIDADES ENERGÉTICAS MUNDIAIS

A previsão apresentada na *International Energy Outlook* em 1996 (IEO96) estimava que nos 20 anos seguintes, o mundo iria requerer e produzir cada vez mais energia. Isto deve-se muito ao facto de um elevado crescimento económico e populacional; assim como, à mudança de estilo de vida, sobretudo em países em crescente desenvolvimento, oriundos fundamentalmente da Ásia (que é onde reside 50% da população mundial), mas também em países com uma economia considerada já avançada, pertencentes à *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD). Estas novas exigências energéticas poderiam ser satisfeitas a partir dos recursos disponíveis, essencialmente combustíveis fósseis, combustíveis esses que iriam causar uma emissão de carbono para a atmosfera que em 2015 superariam em 50 % os níveis medidos naquela época [WEC, 2007].

A União Europeia (UE), em 2007 propôs o desenvolvimento de um plano estratégico, sobre tecnologia energética, denominado por SET (*strategic energy technology plan*), que abrangia vários setores de energia como por exemplo, o setor primário, como o gás natural, o setor de transformação e o de distribuição, que se podem traduzir em aplicações de

aquecimento, quer domésticas quer industriais, obtidas por exemplo através das energias renováveis.

A Comissão Europeia pretende, de uma forma gradual, lançar novas iniciativas energéticas, nos campos eólico e solar, assim como nos processos de armazenamento e de transporte, na conceção de redes elétricas, em parcerias envolvendo entidades públicas e privadas ou até levando à cooperação entre os demais estados membros da EU.

Esta comissão tem também o objetivo da criação de uma aliança Europeia na pesquisa energética, de forma a ser possível a existência de coordenação no que diz respeito ao planeamento dos diversos centros de pesquisa e das universidades.

O crescimento de recursos, quer humanos quer financeiros, é outro dos fatores associados ao plano SET. O investimento na pesquisa e na inovação deverá aumentar, estando atualmente a criar-se esforços conjuntos entre o Banco de Investimento Europeu e os estados membros. Irão ser criadas oportunidades de preparação de investigadores de energia, para ampliar a qualidade e a quantidade de engenheiros e investigadores nesta área.

Por fim, o plano SET, promove a cooperação, o marketing, a empregabilidade e a acessibilidade às tecnologias com baixas emissões de carbono. A EU, tem o intuito de através da colaboração entre os países desenvolvidos e os países ditos como tendo economias emergentes, atingir a sustentabilidade do desenvolvimento das energias limpas, que sejam competitivas e seguras, através de projetos conjuntos que visem a utilização de mecanismos do protocolo de Quioto [SET Plan, 2007].

Numa conferência da Organização das Nações Unidas (ONU), em Poznan na Polónia, os Estados Unidos da América (EUA), o maior emissor mundial de gases com efeito de estufa, acordaram empenhar-se para contribuírem para o acordo de Copenhaga (que foi realizado em 2009), no qual os países desenvolvidos apresentaram propostas de redução dos valores das emissões destes gases, tendo em vista chegar ao acordo sobre esses valores, ao final de 2009, pois o protocolo de Quioto encerraria em 2012 [CAC, 2008].

Nos últimos anos os pressupostos deste acordo têm vindo a ser discutidos, uma vez que em 2009 não tinham sido encontradas soluções que satisfizessem os objetivos pretendidos da emissão de gases e efeito de estufa. No âmbito das conferências das Nações Unidas sobre

as alterações atmosféricas têm vindo a ocorrer sucessivos encontros, tendo sido, no ano de 2010 em Cancun no México, em 2011 no Continente Africano, nomeadamente na África do Sul na cidade de Durban, onde foram negociadas medidas, como por exemplo a criação de um Fundo Climático Verde, para o qual foi criada uma estrutura de gestão que ajudará países pobres na adaptação às mudanças climáticas (será negociado em 2015 e entrará em vigor em 2020). Após estas sucessivas tentativas de os países chegarem a um compromisso que seja assumido por todos, foi marcada uma reunião que teve lugar em Doha no Qatar da qual se esperam avanços significativos [Carvalho, 2012].

Os Delegados dos governos presentes na Conferência, entre outros objetivos, prolongaram o Protocolo de Quioto por um período de 8 anos, no entanto a Rússia, o Japão e o Canadá não aderiram. As iniciativas climáticas nos países em desenvolvimento que melhoraram a vida dos povos urbanos também foram temas debatidos na Conferência, bem como abordagens inovadoras para alcançar soluções para a mudança climática [Carvalho, 2012], [ONU, 2012].

Nos EUA, mais propriamente no estado do Lousiana, os equipamentos solares (painéis fotovoltaicos para aquecimento de água, de soalhos ou de piscinas) quando colocados nas residências, são considerados propriedade privada estando isentos de qualquer imposto adicional (todo o custo do equipamento está isento). Algumas empresas criaram sistemas de crédito apropriados para financiamento de sistemas eólicos ou solares [IRE, 2008].

A UE, afirmou-se na liderança mundial no que respeita ao investimento nas energias renováveis, ao estabelecer que deveriam ser alcançadas metas, nomeadamente a redução de 30% das emissões de carbono até 2020, face às que existiam em 1990. Portugal foi um dos 27 membros que acordaram o cumprimento destes objetivos de política climática da UE para a próxima década [MAODR, 2008].

O governo Português incentivou as famílias a procederem à instalação de painéis solares, através de facilidades no acesso ao crédito bancário bem como em benefícios fiscais (30%). Foi um programa de incentivos do governo à utilização de energias renováveis dirigidas ao setor residencial, que pretendia atingir o objetivo de 65 mil habitações em 2009 com estas energias, visando cumprir 25% da meta prevista para 2015 do plano nacional de ação para a eficiência energética, agindo com um investimento global de 25 milhões de euros [MFAP, 2009].

## **2.2. ENERGIAS RENOVÁVEIS**

Em 1997 a exigência energética era de 12 trilhões de kWh e prevê-se que em 2015 seja de 19 trilhões de kWh, o que representa um aumento anual de 26% (nos países desenvolvidos será de 50%, o que neste caso representa quase o dobro da média mundial).

Em 1997 as exigências a nível mundial eram satisfeitas recorrendo em grande parte a recursos fósseis e nucleares, sendo apenas uma pequena porção assegurada pelas energias renováveis (por exemplo eólica, solar, bio massa, geotérmica e aproveitamento das marés). As energias eólica e solar foram as que tiveram um crescimento mais rápido (entre 1987 e 1997), sendo energias limpas que geram energia junto de acumuladores, o que permite eliminar a necessidade de recorrer a linhas de alta tensão para efetuar o transporte de energia através de zonas rurais e urbanas.

Por volta de 1980, os custos associados à energia eólica diminuíram cerca de 80% (custos gerais, incluindo manutenção, montagem, etc.), possibilitando o aumento da construção de parques eólicos em cerca de 95%. Nos EUA, estes fatores, contribuíram para que o custo da eletricidade gerada com recursos eólicos baixasse para cerca de 70% por kWh. Este custo torna este tipo de energia muito competitiva face a restantes formas convencionais para geração de energia [WSPS, 1999].

### **2.2.1. CONJUNTURAS NATURAIS**

O nosso planeta (Figura 1) está exposto à energia solar, que influencia vários fatores naturais que ocorrem no planeta Terra, como por exemplo a radiação solar, o ciclo das águas, as marés ou os ventos.



**Figura 1 Planeta Terra [NASA, 2012]**

Na Figura 2 pode-se observar que o sul da Europa é uma região que recebe mais radiação solar relativamente ao norte e centro deste continente. Portugal recebe entre 1461 kWh/m<sup>2</sup> e valores superiores a 1861 kWh/ m<sup>2</sup>, possuindo assim condições favoráveis por exemplo para a instalação de sistemas que recorram ao uso da energia solar.

Pode ser também constatado através da observação da Figura 3, que o sul da Europa (zona mediterrânica) e o Norte de África evidenciam valores de radiação solar que denotam condições propícias para a exploração desta fonte de energia.

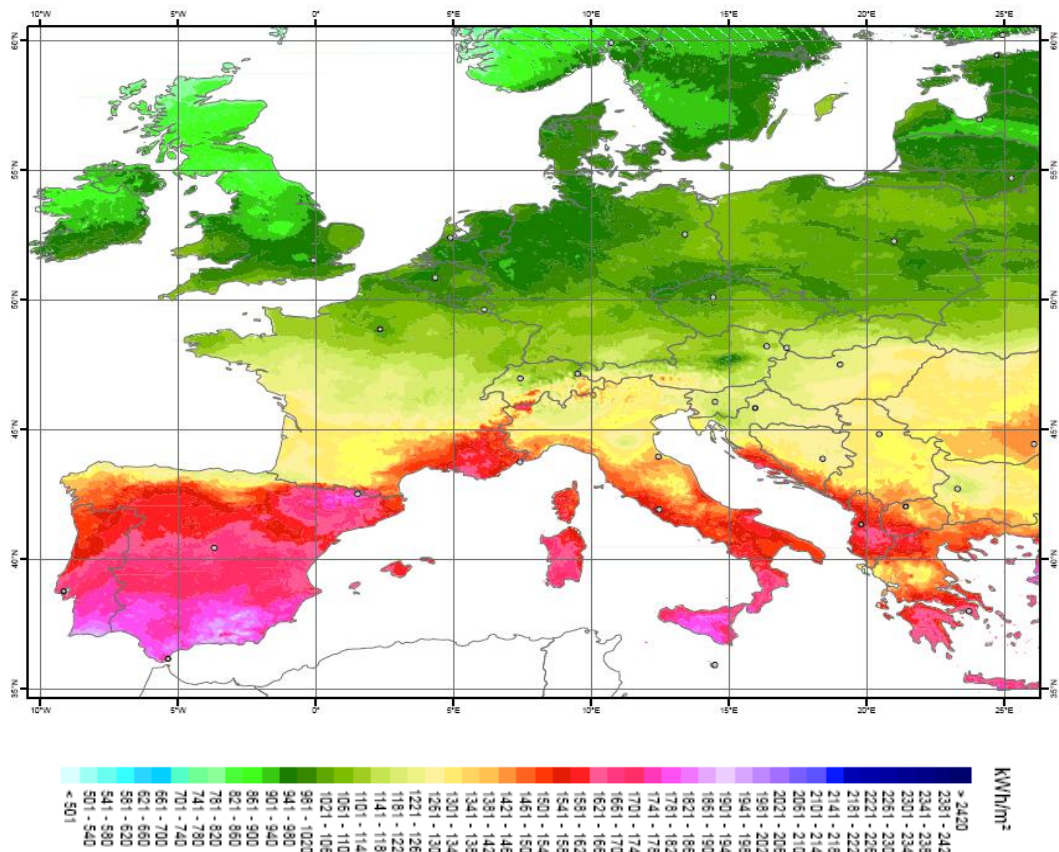


Figura 2 Radiação Solar na Europa [METEOTEST, 2008]

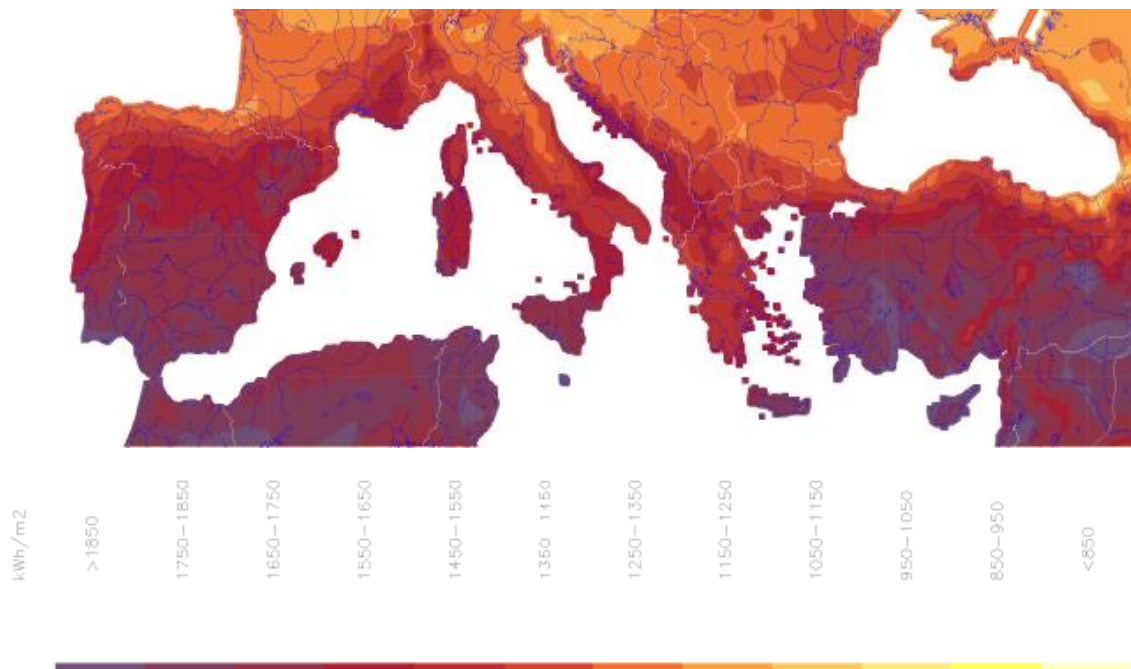


Figura 3 Radiação solar na Europa mediterrânea e Norte de África [METEOTEST, 2008]

### 2.2.2. ENERGIA

Os recursos energéticos são decisivos para que se obtenha um bem-estar da humanidade a vários níveis, quer económicos, quer sociais.

Atualmente, o objeto central da energia é garantir o fornecimento da mesma, das grandes quantidades necessárias às economias mundiais em crescimento, mas de uma forma económica e ambientalmente sustentável. Existem diversos estudos que indicam uma duplicação das necessidades energéticas mundiais até próximo de 2050, em que a China poderá tornar-se o maior utilizador mundial de energia primária. Porém, a Índia está no caminho do mesmo consumo energético da China, em que os dois representam quase 40% da população mundial.

Segundo um estudo rigoroso realizado pelo Conselho Mundial de Energia (CME), este declara que a energia é suficiente, no entanto, a sua existência é escassa em alguns locais com menos necessidades energéticas. Este estudo do CME de 2007 denominado por: “Decidir o Futuro: Cenários de políticas Energéticas para 2050” tinha como objeto principal as políticas para lidar com estes desvios energéticos. Um conjunto de dados essenciais, necessários aos decisores são a localização das reservas, as suas formas e quantidades.

O CME utiliza a terminologia “Recursos” para referir-se às “*quantidades cuja existência é conhecida ou dedutível e que são potencialmente acessíveis*”. Relativamente aos recursos energéticos, estes podem ser classificados em dois grupos principais essenciais. O grupo dos finitos em que temos o exemplo dos minerais e o grupo dos perpétuos que inclui os recursos renováveis, como a energia solar, eólica, marés, entre outros.

O grupo dos recursos finitos abrange uma porção de substâncias de base orgânica: Carvão, Crude, Xistos Betuminosos, Betume Natural e Petróleo Pesado, e Gás Natural, mas também os metais Urânio e Tório.

Os recursos perpétuos provêm de uma fonte “extraterrestre”, o Sol, englobando a Energia Solar, Eólica e a Bioenergia. Mas, existem também outros recursos perpétuos, a partir dos recursos marítimos, como: a Energia das Ondas, Energia das Marés e à Energia do Gradiente Térmico dos Oceanos.

Para além dos recursos energéticos já enumerados, existem outros dois considerados como intermédios, pois reúnem elementos do grupo finitos e perpétuos: Turfa e Energia Geotérmica.

### 2.2.3. RECURSOS FINITOS

O **carvão** (Figura 4), pertencente aos recursos finitos, é a fonte principal na indústria energética mundial, o que deteve maior crescimento nos últimos anos, e o primeiro combustível fóssil a ser aproveitado numa dimensão industrial.



Figura 4 Carvão [dvivo, 2012]

Comparativamente a outros combustíveis fósseis, o futuro competitivo do carvão pode ser acentuada pelo desenvolvimento das tecnologias e instalações de carvão líquido, que estão planeadas ou em execução, em alguns dos principais países produtores de carvão.

O incentivo para eliminar emissões de gases de efeito de estufa reflete-se no interesse crescente na recuperação e utilização do metano das minas de carvão (CMM), e nas técnicas de gaseificação subterrânea de carvão, bem como na investigação de diferentes formas de recolha e armazenamento de carbono, cujo sucesso pode constituir um fator chave para o futuro a longo prazo do carvão.

Outro recurso finito é o **crude ou petróleo**. A região com mais reservas de petróleo é o Médio Oriente, pois detém 61% do total global, seguido de 11% pertencente a África, 8% da América do Sul e 8% da Europa (incluindo a Federação Russa na sua totalidade), e por último, América do Norte que se situa abaixo dos 5%.

Um dado a apontar é a continuidade da existência do petróleo nos próximos anos, questionando-se até o seu esgotamento. A altura do pico de produção de petróleo convencional é alvo de grande debate, mas é provavelmente menos importante do que a visão do longo declínio que surge na perspectiva mais desapaixorada.

Os **xistos betuminosos** – rochas sedimentares das quais podem ser extraídas quantidades significativas de petróleo e gás – podem ser encontrados em muitas partes do mundo: os recursos globais de xistos betuminosos são conservadoramente estimados em 2.8 trilhões de barris. Foram identificados depósitos em 38 países, com os maiores recursos localizados nos Estados Unidos e na Federação Russa. Os xistos betuminosos podem ser queimados diretamente ou processados para obtenção de uma variedade de combustíveis líquidos. De uma forma geral, a produção convencional de petróleo tem custos menores do que os dos envolvidos na extração e processamento dos xistos betuminosos. O maior depósito conhecido de xistos betuminosos é a Formação de *Green River* no Oeste dos Estados Unidos, com um total estimado de 1,5 trilhões de barris de petróleo, dos quais metade poderá ser recuperável. O recente aumento do preço do petróleo fez com que o governo dos Estados Unidos incentivasse o desenvolvimento comercial da Formação de *Green River*, através de programas de *I&D* e empréstimos, dos quais seis foram concedidos em 2006 – 2007. No início de 2007 o *US Office of Naval Petroleum* anunciou que o Noroeste do Colorado poderia vir a produzir petróleo a partir de xistos, numa base comercial, em 2015.

O **betume natural**, designado também por areias asfálticas, ou areias de petróleo e o petróleo pesado qualificam-se pela sua alta, viscosidade, densidade e altas concentrações de oxigénio, nitrogénio, metais pesados e enxofre. No caso do betume natural, o país com mais reservas mundiais, cerca de 70%, é o Canadá, mas para o petróleo pesado é a Venezuela que contém cerca de 98% das reservas.

Devido a abundantes sucessos de prospeção e de uma melhor avaliação nalguns campos, desde 1980, as reservas evidenciadas de gás natural a nível mundial, aumentaram a um ritmo médio anual de 3,4%, comparando com os 2,4% do petróleo. O centro de informação internacional da indústria do gás natural, a Cedigaz, assume que com a abundância de reservas de gás descobertas e as perspectivas de um imenso campo por descobrir, atribui ao gás natural um período de vida provável com mais de 130 anos, tendo em conta as atuais taxas de consumo.

Outro contributo fundamental para o abastecimento mundial de energia, em centrais de energia nuclear, é o **urânio** (Figura 5), considerado um elemento metálico radioativo, através da fissão, ou seja, da sua utilização como fonte de calor. Este elemento metálico radioativo obteve uma produção de 41,7 mil toneladas a nível mundial em 2005, a partir da contribuição de nove países, correspondente a quase 95% da produção mundial. Devido a este fator existem diversos países, como a Argentina, Bulgária, Chile e Finlândia que interromperam a sua produção, devido a razões económicas, porém, ponderam aumentar a produção ou até reavivar minas abandonadas.



**Figura 5 Urânio [geoinfo, 2013]**

Quanto a este recurso, é de salientar, o acidente catastrófico de Chernobyl em 1986, que causou uma cultura de segurança baseada na melhoria constante, através da análise das experiências e a partilha de boas práticas.

Outro fator limitativo é o investimento atempado em novas centrais de produção. Dado que o tempo necessário para transformar o urânio extraído em combustível nuclear é considerável, as necessidades globais dos reatores terão de continuar a confiar em fontes secundárias por mais uma década.

#### **2.2.4. RECURSOS INTERMÉDIOS**

A **turfa** é um combustível intermédio, entre a biomassa pela qual era originalmente constituída e o carvão em que se tornaria casualmente, a partir de condições geológicas adequadas. Esta encontra-se em formação em diversos locais do mundo, sendo, por isso considerada, até a um certo momento “renovável”.

Os recursos mundiais de turfa são numerosos. Esta abarca uma área total de 3 milhões de  $\text{km}^2$ , ou seja, cerca de 2% do total da superfície terrestre continental. Os principais depósitos encontram-se na Europa do Norte e Central, Indonésia, América do Norte e na região Norte da Ásia e o seu volume total de turfa “*in situ*” é da ordem dos 3500 a 4000 bilhões de  $\text{m}^3$ .

Este combustível intermédio tem muitas aplicações, sendo uma delas na área da energia. Nesta área, a turfa é usada como combustível para a produção de eletricidade e calor, mas também como fonte de calor direta para fins industriais, residenciais e outros. Hoje em dia, os principais produtores e consumidores de turfa combustível são: a Ucrânia, Irlanda, Suécia, Finlândia, Bielorrússia e Federação Russa, em que o seu consumo para fins energéticos fora da Europa é desprezável, rondando as 17 mil toneladas por ano, em consequência de uma pequena porção da área total de turfa. Na União Europeia, este consumo abrange  $1750 \text{ km}^2$ , isto é, 0,34% do total da área de turfa.

Apesar da **energia geotérmica** (Figura 6) ser convencionalmente classificada como um recurso energético renovável, ou ainda como “Nova Renovável”, esta não é um exemplo característico de uma fonte perpétua de energia, como por exemplo a energia solar, eólica ou marítima. Por um lado, ela é, até certo ponto, sujeita a desgaste – os poços geotérmicos individuais podem entrar em declínio e atingirem a exaustão – mas por outro lado, o abastecimento de energia geotérmica pode ser aumentado, por exemplo, através da injeção de água. Para além disso, a geotermia tem uma longa história de utilização humana, nomeadamente através de fontes quentes, não sendo assim, de forma alguma, uma “nova renovável”.



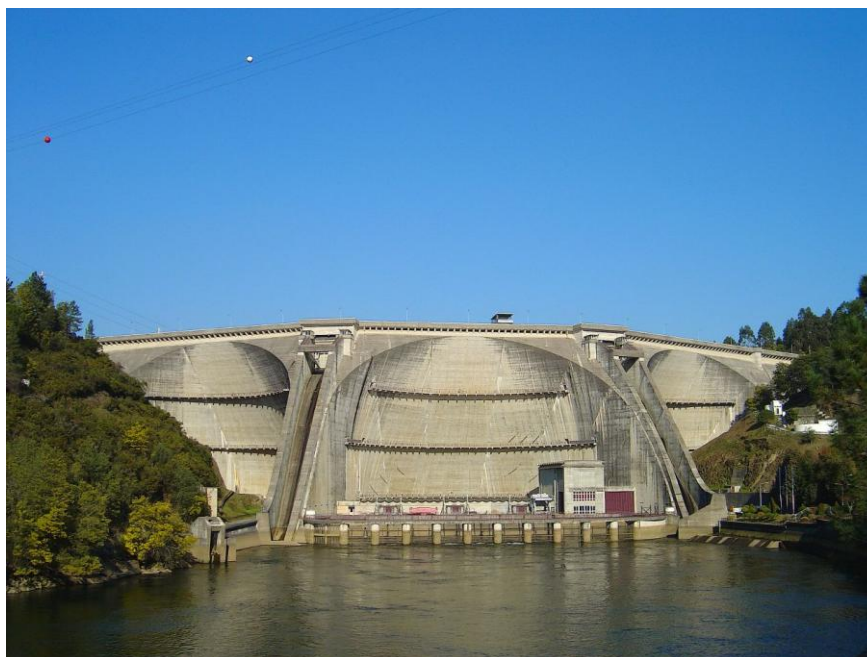
**Figura 6 Geotérmica [eneralt, 2014]**

No sentido mais alargado, a energia geotérmica corresponde ao calor natural da terra o qual pode ser explorado como fonte de energia de duas formas principais. A utilização da energia geotérmica está dividida em duas categorias: a produção de eletricidade e a utilização direta. Na primeira é utilizado o calor que é transferido (sobretudo por condução) do interior extremamente quente da terra para áreas acessíveis perto ou na sua superfície; a segunda é utilizada (através de bombas de calor) a diferença de temperatura entre o ambiente exterior e o interior do solo.

Atualmente, embora, a energia geotérmica esteja a desenvolver-se significativamente na China, a maioria das instalações situa-se na América do Norte e na Europa.

#### **2.2.5. RECURSOS PERPÉTUOS**

Atualmente, a **energia hídrica** (Figura 7) é o mais significativo dos recursos energéticos perpétuos ou recursos energéticos renováveis.



**Figura 7 Hídrica [eneralt, 2014]**

A energia hídrica detinha a maior contribuição da produção total de energia, em 2005, cerca de 87%, ou seja aproximadamente 1/5 das energias renováveis.

Ao longo de 2005, 18 GW de nova capacidade hídrica entraram em funcionamento, levando a capacidade hídrica mundial para cerca dos 778 GW. A produção hidroelétrica durante o ano de 2007 foi superior a 2,8 TWh, representando cerca de 17% da capacidade técnica explorável, atual ou potencialmente, das localizações a nível mundial.

Este recurso hídrico colabora para a geração de eletricidade em 160 países. Cinco países, a saber, o Brasil, o Canadá, a China, a Rússia e os Estados Unidos são responsáveis por mais de metade da produção hidroelétrica mundial.

A forma de aumentar a capacidade hídrica com menores custos é quase sempre modernizar e expandir as centrais existentes, onde esta opção é possível. A maioria das centrais atualmente em operação irão necessitar de modernização até 2030. Enquanto os aumentos de capacidade são geralmente realizados nas centrais existentes, há por vezes possibilidade de instalação de geradores em diques criados para outras finalidades. Existem cerca de 45000 grandes barragens no mundo e a maioria não possui componente hidroelétrica.

O desenvolvimento da capacidade hídrica tem uma vantagem económica a longo prazo, pois os custos anuais de operação são muito reduzidos em comparação com as necessidades

iniciais de capital, resultando no isolamento face ao aumento dos preços dos combustíveis. Outra vantagem decorre da flexibilidade do armazenamento hídrico (utilizando reservatórios) e, onde apropriado, sistemas de armazenamento e bombagem, o que contribui para garantir a segurança total dos sistemas e a qualidade do abastecimento em sistemas de energia híbridos, em conjunto quer com os combustíveis fósseis, quer com o crescente batalhão de renováveis – inicialmente sobretudo as energias eólica e geotérmica mas, em devido tempo, também as solar, bioenergia e energia marítima.

O termo **bioenergia** anuncia o uso de matéria vegetal como fonte de energia, cobrindo uma diversidade de combustíveis, como a madeira, as culturas energéticas, os resíduos agrícolas, os resíduos sólidos urbanos e os gases de aterro, com utilizações nos principais setores do consumo de energia: produção de energia, transportes, indústria, doméstico, entre outros.

A principal categoria sob a designação de bioenergia é a madeira, que nas suas formas variadas contribui com quase metade do total estimado de combustíveis renováveis e resíduos (cerca de 48 hexajoules -  $48 \times 10^{18} \text{ J} = 48 \text{ EJ}$ ). Os combustíveis de madeira integram três variantes principais: lenha, carvão e licor negro (um subproduto da indústria de pasta e papel). O consumo global de madeira para finalidades energéticas era em 2005 de aproximadamente 22 EJ, englobando 17,9 EJ de lenha, 1,4 EJ de carvão e 2,7 EJ de licor negro.

Relativamente aos consumidores de lenha, estes são de dois tipos. Primeiro, nos países industrializados, o utilizador atual de lenha usa geralmente um equipamento de combustão de grande eficiência sob normas estritas de controlo de emissões, ao passo que o utilizador do mundo em desenvolvimento utilizará pequenas fogueiras e fogões ineficientes e muito poluentes. A poluição do ar interior é um grave problema de saúde pública nos países menos desenvolvidos.

Depois da produção de carvão vegetal, a segunda maior transformação de biomassa é a produção de eletricidade. As centrais de cogeração são, há muitos anos geridas por indústrias de processamento de biomassa como as do açúcar, produtos de madeira e produção química de polpa, com algumas a produzirem excedentes que são exportados para redes nacionais e regionais. Mais recentemente, têm surgido centrais de cogeração a biomassa ligadas a redes de distribuição de *district heating* (alimentadas a palha na

Dinamarca e a resíduos de madeira na Finlândia e na Suécia). A cogeração a biomassa com carvão também tem sido introduzida com sucesso em algumas regiões. A produção estimada de eletricidade a partir de biomassa a nível mundial era de 183 TWh em 2005, dos quais aproximadamente 75% era produzida a partir de biomassa sólida, 14% a partir de biogás e 12% a partir de resíduos sólidos urbanos.

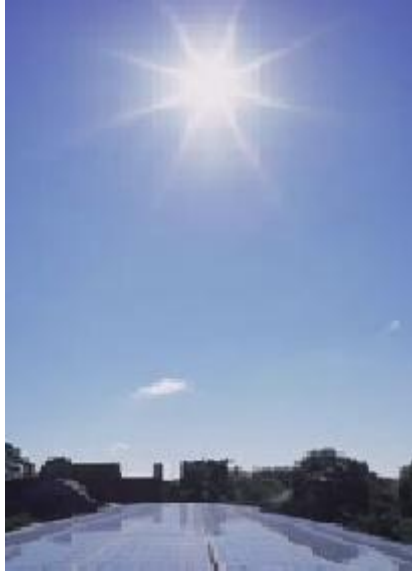
O interesse nos biocombustíveis (etanol e biodiesel) encontra-se num pico sem precedentes. O aumento continuado do preço do petróleo em 2005 e 2006 originou a quebra da relação tradicional entre o preço da bioenergia e o do petróleo. Pela primeira vez desde os anos 30 (século XX), o preço do petróleo importado pelos Estados Unidos excedeu o do milho doméstico. Muitos países aumentaram os seus objetivos para os biocombustíveis e os ganhos da produção em massa foram atingidos, nomeadamente nos Estados Unidos e no Brasil. A produção mundial de etanol em 2006 é estimada no equivalente a 1,1 EJ, para os quais os Estados Unidos contribuíram com 40% e o Brasil com 37%.

O outro biocombustível significativo é o biodiesel, que atualmente é produzido a partir de óleos vegetais, gordura animal e outras gorduras, por estratificação. O produto resultante é misturado com diesel convencional em proporções entre 5% e 20%. Uma segunda geração de biodiesel (“diesel renovável”) é produzido através do tratamento de óleo vegetal com hidrogénio em catalisadores e ou misturado (5% a 50%) ou coprocessado como “diesel fóssil”. A produção de biodiesel em 2005-2006 foi de aproximadamente 0,3 EJ.

A expansão dos biocombustíveis não deixa de gerar controvérsia, uma vez que a produção de etanol a partir do milho é apenas positiva em termos energéticos a uma margem de 1,4:1, enquanto que a partir da cana de açúcar brasileira tem uma margem de 8 unidades de líquido renovável para 1 unidade de combustível fóssil. Por outro lado a produção de milho e de etanol é largamente subsidiada nos Estados Unidos e na Europa, ao passo que o Brasil já aboliu a maioria dos subsídios à produção de cana de açúcar.

Dada a utilização em larga escala de recursos florestais como combustível, a expansão futura do abastecimento de biomassa para fins energéticos resultará, antes de mais, de duas fontes: resíduos agrícolas e culturas energéticas, como a erva de pastagem nos EUA ou *miscanthus* na Europa, cultivados principalmente nos países com uma grande área agrícola e baixa densidade populacional.

O **sol** (Figura 8) é a fonte energética mais abundante e contínua do planeta Terra. Esta energia encontra-se presente direta e indiretamente. Diretamente sob a forma de radiação solar e indiretamente através das energias do vento, da biomassa, da água e dos recursos marinhos. Aqui vai ser abordada, exclusivamente, a utilização direta da radiação solar.



**Figura 8 Sol [eneralt, 2014]**

Abordando, esta fonte energética sob a forma de radiação solar, que anualmente atinge a Terra, esta é 7500 vezes maior do que o consumo anual de energia mundial de 450 EJ, sendo variável de local para local, e onde em algumas partes da terra a sua irradiação é muito maior do que a média anual de  $170 \text{ W/m}^2$ . Contudo, existe um recurso solar aproveitável em quase todas as partes do mundo e as aplicações atraentes a nível económico não se encontram confinadas às regiões mais solarengas.

Atualmente, existem dois tipos básicos de aparelhos utilizados para captar a radiação solar:

- coletores solares térmicos: usados para aquecer ar, água ou outros líquidos, dependendo da finalidade;
- coletores fotovoltaicos (PV): têm a função de converter a radiação solar diretamente em eletricidade.

Os coletores solares não concentradores ou planos, que são normalmente instalados como painéis nos telhados das casas, podem produzir temperaturas até perto dos  $100^\circ\text{C}$ , tendo

como finalidades o aquecimento e o arrefecimento de edifícios, abastecimento de águas quentes sanitárias e calor industrial.

Por outro lado, os coletores concentradores de média temperatura com pratos parabólicos produzem temperaturas entre os 100-400°C, com aplicações em calor industrial, refrigeração e produção de eletricidade. Não esquecer que muito do calor utilizado em processos industriais é inferior a 250°C.

Os coletores solares do tipo recetor concentrado são utilizados para produzir eletricidade com aplicações em fornos industriais com temperaturas até 2000°C ou mais.

Os painéis solares fotovoltaicos são sólidos, por isso muito resistentes, com uma longa vida útil. Atualmente, os painéis mais comuns baseiam-se em células solares de silicone cristalino ou policristalino. A sua eficiência tem aumentado gradualmente, enquanto os custos têm decrescido. A principal vantagem dos sistemas PV é poderem ser instalados como sistemas isolados, fornecendo energia desde microwatts a megawatts. Em 2005 as vendas de módulos PV para aplicações terrestres excederam os 1700 MW<sub>p</sub> (Mega watts pico) estando o mercado global em crescimento a uma taxa anual de 35%.

O projeto de edifícios contemplando a energia solar pode reduzir a utilização de energia convencional até 75%. Estes projetos utilizam os conhecimentos sobre o posicionamento do sol tanto para permitir que a luz solar entre no edifício para aquecimento como para sombrear o edifício permitindo o arrefecimento, considerando a ventilação e a luz natural.

Nos países em desenvolvimento estão a ser criados novas aplicações de energia solar, tais como para o tratamento de águas poluídas ou para aparelhos solares de destilação.

Os **recursos eólicos** mundiais são imensos, tendo sido estimado que se fosse utilizado 1% da superfície continental disponível e considerando o fator de fraca capacidade produtiva do recurso, o potencial eólico chegaria perto do nível atual de produção energética mundial.

Os recursos eólicos *offshore*, isto é, referentes ao mar, são também gigantescos. Assim os milhares de quilómetros de costa Europeia permitem satisfazer a procura de eletricidade em toda a União Europeia aos níveis atuais.

A capacidade eólica cresceu rapidamente desde 1990, duplicando a cada 3 anos e meio, visando atingir os 72000 MW no final de 2006, com uma produção anual de aproximadamente 160 TWh. Apesar da maioria da potência instalada se encontrar em terra, foram já instalados parques *offshore* em enumeras localizações, encontrando-se outros em fase de construção ou planeamento. Além disso, o tamanho das turbinas a instalar tem vindo a crescer, com muitas das máquinas em terra a atingir o patamar dos 2 MW, sendo substancialmente maior nas turbinas *offshore* (até 5 MW, e lâminas com diâmetros na ordem dos 110 m).

Tem-se verificado que a integração de eletricidade proveniente de parques eólicos nos sistemas de abastecimento de eletricidade nacionais ou regionais pode ser atingida rapidamente, até ao ponto em que a energia eólica represente perto de 20% do consumo total de eletricidade. Para além deste ponto, alguma energia pode ter de ser reduzida, quando os picos de vento coincidem com baixos níveis de procura.

O nível de apoio político dos governos e da comunidade internacional, reflete-se na previsão de um desenvolvimento substancial na capacidade eólica, e posteriormente, no empenho em atingir os objetivos de redução de emissões.

As **marés** são variações cíclicas do nível das águas dos mares e oceanos, que fomentam correntes de água, constituindo potenciais fontes de energia.

De forma a aproveitar a energia das marés existem duas abordagens básicas. Uma que explora o processo do subir e descer cíclico do nível das águas através de barreiras, e a outra que verifica e utiliza as correntes locais de marés.

Há muitos locais em que a condição geográfica induz grandes movimentos de marés, sendo exemplos a Baía de *Fundy* no Leste do Canadá, Estuário de *Severn* no Oeste da Inglaterra e a boca do Rio *Rance* no Norte de França. Nestes locais, bem como num número de outros, esquemas de aproveitamento da energia das marés foram apresentados, mas muito poucos foram implementados até ao momento; o único com significado real é a Central de 340 MW em *La Rance* na Bretanha, que é operada com sucesso desde 1966. A abordagem base é sempre a mesma: um estuário ou baía com uma grande amplitude de marés a ser fechado por uma barreira física, muitas vezes projetada para incluir uma estrada ou um caminho de ferro, por forma a maximizar os benefícios. A eletricidade é gerada pela passagem do fluxo

de água de um lado para o outro, através de turbinas dianteiras baixas. Foram propostas várias configurações utilizando bacias simples ou múltiplas.

Uma vez que os sistemas de barragens de marés são passíveis de causarem alterações ambientais consideráveis, lagoas artificiais foram propostas como alternativas, sendo a sua principal vantagem a grande redução do impacto na linha costeira e zona entre marés. O conceito requer, no entanto, investigação mais aprofundada.

Já foram promovidos vários projetos de demonstração na Europa e nos Estados Unidos com o objetivo de dominar o potencial das marés e utilizar a energia das correntes de maré.

O grande investimento necessário para os sistemas de barragem de marés são passíveis de restringir o seu desenvolvimento num futuro próximo. Contudo, com interesses em projetos de barreiras maiores do que no passado, é cada vez mais provável que surjam novos desenvolvimentos das barragens e lagoas, especialmente onde possam ser combinados com novas infraestruturas de transportes. Se o protótipo de sistema correntes-marés atualmente em desenvolvimento se provar bem sucedido, as instalações de carácter comercial poderão começar a surgir já nesta década, fornecendo eletricidade a comunidades rurais, costeiras ou a ilhas.

A energia das **ondas** (Figura 9) é uma manifestação concentrada de energia solar, em que os ventos gerados pelo aquecimento diferencial da terra passa através de grandes massas de água, transferindo alguma da sua energia para criar ondas. As regiões com os regimes de ondas mais energéticos incluem a costa Oeste das Américas, Europa, Sul de África e Ásia Austral. A energia das ondas a nível mundial, em águas com profundidades acima dos 100 m, foi estimada entre 1 e 10 TW, enquanto os recursos economicamente exploráveis são da ordem dos 140-750 Wh/ano para a tecnologia atual, quando atingida a maturidade, e poderá atingir os 2000 TWh/ano se forem conseguidos melhoramentos substanciais à tecnologia existente.



**Figura 9 Ondas [eneralt, 2014]**

Os custos de operação dos primeiros sistemas de energia das ondas são elevados, como o são todos os custos fixos contra o resultado da operação de uma única instalação. Contudo, os sistemas subsequentes deverão demonstrar melhorias de eficiência e a diminuição de custos, resultantes da otimização dos projetos e da produção em série. Para que os custos da produção possam ser reduzidos para níveis comparáveis com outros recursos renováveis, seria necessário instituir algum tipo de subsídio temporário.

Fora do circuito atual de propostas, existem várias tecnologias promissoras que se encontram prontas para desenvolvimento. Por forma a atingirem todo o seu potencial, estas tecnologias vão necessitar de algum apoio, o que está a começar a ser disponibilizado por alguns governos. De acordo com o desenvolvimento desta situação a energia das ondas poderá começar a dar uma contribuição significativa para o abastecimento energético dentro de 5 a 10 anos.

A Energia do **Gradiente Térmico dos Oceanos** (OTEC) é uma forma de converter em energia útil a diferença de temperatura entre a superfície das águas dos mares tropicais e subtropicais e as águas frias a uma profundidade de aproximadamente 1000 metros, que provêm das regiões polares. Uma diferença de temperatura de 20° C é adequada para a OTEC. Este nível pode ser encontrado em grandes áreas de oceano, particularmente perto de ilhas e ao largo da costa de alguns países em desenvolvimento. Para além da diferença térmica dos oceanos, um conjunto de outros fatores têm de ser considerados antes de seleccionar um determinado país ou localização como adequada para um projeto OTEC.

Dependendo da localização das águas quentes e frias, as centrais OTEC podem encontrar-se em terra, ser flutuantes ou anfíbias. Comparadas com as instalações fixas em terra, as centrais flutuantes têm a vantagem de um pipeline de água fria menor, mas envolvem maiores custos de transmissão de energia. O conceito de uma central de OTEC anfíbia tem sido associada à produção de hidrogénio e oxigénio líquidos, que seriam enviados através de navios tanques para países importadores de energia. Algum do hidrogénio poderia ser utilizado para a produção de fertilizantes de amónia.

Ao contrário da maioria das tecnologias de energias renováveis, a OTEC tem a vantagem de fornecer carga base de energia disponível a um ritmo constante de 24 horas por dia, com pequenas variações de acordo com as estações do ano. As centrais OTEC também podem ser projetadas para serem integradas em vários outros sistemas, como por exemplos nas áreas da agricultura e aquicultura, produtos farmacêuticos, água potável, ar condicionado, etc. A família resultante dos Aplicações em Águas Oceânicas Profundas (DOWA) pode melhorar significativamente a face financeira dos esquemas OTEC.

A comercialização economicamente viável de OTEC / DOWA irá exigir a operação bem sucedida de um número de centrais experimentais. Atualmente os esforços estão centrados em obter financiamentos adequados para permitir atingir a fase de demonstração [CMEL, 2007].

Neste trabalho de dissertação foram consideradas as energias eólicas e solares, sendo por isso nas próximas secções apresentada com maior detalhe cada uma delas.

### **2.3. ENERGIA EÓLICA**

Os ventos (Figura 10) são causados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, devidas ao facto de a radiação solar recebida na terra ser maior nas zonas equatoriais do que nas zonas polares, portanto a origem do vento é a radiação solar. Os ventos mais fortes, constantes e persistentes ocorrem em áreas localizadas a cerca de 10 km da superfície da terra. Como não é realizável colocar os conversores eólicos nessas zonas, o espaço de interesse encontra-se limitado a algumas dezenas de metros na atmosfera. A estas alturas, o vento é diretamente afetado pela fricção na superfície, o que provoca uma diminuição na sua velocidade [Castro, 2009].



**Figura 10 Vento [Siemens, 2014]**

Para que exista desenvolvimento a nível eólico, as decisões políticas e financeiras, tornam-se fundamentais, de modo a que exista um retorno sustentável do investimento necessário. As aplicações primordiais desta tecnologia eram sobretudo em bombas de água (mecânicas ou por energia elétrica), em sistemas de energia remotos (carregamento de baterias) e para o aquecimento, sendo instaladas normalmente em grupos e em zonas montanhosas, planícies e até mesmo vales.

Entre os anos de 1981 e 1987 o investimento em instalações eólicas nos EUA era superior ao da Europa, mas a partir do ano de 1988 até 1995, novos dados revelam que a Europa destronou os EUA para o segundo posto na liderança do desenvolvimento a nível das instalações eólicas.

Outro fator relevante é a produção de energia com base em recursos eólicos, onde os EUA entre 1983 e 1993, se superiorizam relativamente à Europa mas, a partir de 1994 a Europa supera a produção Americana. A Dinamarca é o país Europeu pioneiro na área de geração de energia, já que desde 1891 que fazem o aproveitamento do vento para gerar energia. Este país possui condições geográficas e climáticas favoráveis, tendo por isso sido o país de maior sucesso comercial no setor eólico, comercializando inclusivamente turbinas eólicas durante a 1ª guerra mundial. Mais tarde, na década de 90 a Alemanha também avança consideravelmente, nesta área, aliás a par dos EUA foram os países que mais investiram neste campo [WECA, 1995].

Apesar de todas as suas limitações, o Atlas Europeu de Vento representou um esforço importante para produzir um instrumento de trabalho válido de avaliação do potencial eólico com vista à produção de energia elétrica [Castro, 2009].

### 2.3.1. HISTÓRICO PRIMORDIAL

Com origem na Pérsia antiga, um engenho denominado por “*panemone*” (máquina usada para criar energia mecânica), atravessou o Médio Oriente e o Mediterrâneo chegando à Europa. Usado em moinhos que se alastravam por toda a Europa, foi inicialmente usado como bomba de água e mais tarde para geração de energia elétrica (que era usada para, por exemplo, carregar baterias). Comparativamente com outras tecnologias energéticas, a eólica é a que atingiu a maturidade tecnológica de forma mais célere [WECA, 1995].

### 2.3.2. MODELOS CONCEPTUAIS DE TURBINAS EÓLICAS

Existem dois tipos básicos em que assentam os géneros de turbinas eólicas, tendo eles eixo horizontal ou vertical. Nas de eixo vertical podemos encontrar vários estilos (na Figura 11) como por exemplo, “H”, “Delta”, “Diamond”, “Y”, “Φ”, “bi-blade / three-blade Darrieus”. A velocidade do vento e o ângulo a que as lâminas se encontram determinam o aproveitamento que irá ser retirado do vento.

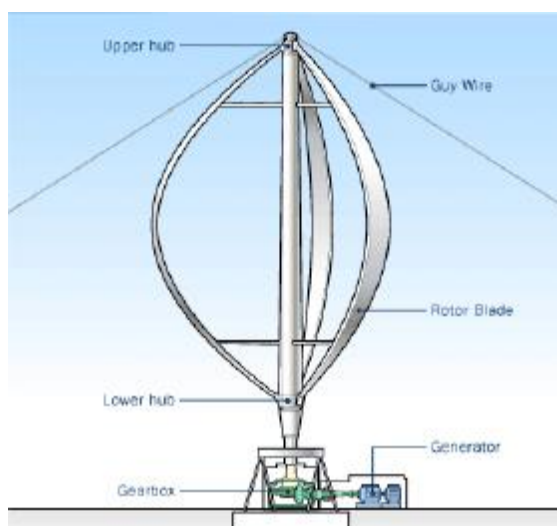


Figura 11 Turbina Darrieus [Castro, 2009]

Quanto à concepção, os rotores de duas ou três lâminas são mais eficientes que os de uma lâmina que causam mais ruído e necessitam de um contrapeso. Com duas lâminas, existe a vantagem de o rotor ser mais barato e conseguir atingir velocidades maiores para além de

permitir maior facilidade de instalação relativamente ao uso de três lâminas. Estas últimas têm como vantagens, serem as menos ruidosas e as que fornecem mais energia.

Os materiais utilizados são diversos e a sua escolha depende da sua aplicação, por exemplo, madeira, fibra de vidro, aço, alumínio ou ferro, no entanto, os materiais metálicos deverão ser evitados pois refletem os sinais televisivos, criando “imagem fantasma”. Muitos dos desenvolvimentos das lâminas tiveram origem nas bases aeronáuticas.

Em 1995, ano em que alguns países Europeus apostavam nos recursos eólicos, o custo de manutenção das turbinas era de 0,01 dólares por kWh, sendo necessárias entre 20 a 50 horas para a manutenção das condições necessárias para o bom funcionamento dos equipamentos [WECA, 1995].

Quanto às principais vantagens das turbinas de eixo vertical podem ser sumariadas da seguinte forma:

- Simplicidade na conceção;
- Insensibilidade à direção do vento, dispensando o mecanismo de orientação direcional;
- Possibilidade de instalação junto ao solo de todo o equipamento de conversão da energia mecânica;

Mas são os inconvenientes desta solução, que levam a que as turbinas de eixo horizontal tenham um maior sucesso comercial, uma vez que as primeiras:

- Possuem velocidades do vento muito baixas junto à base;
- Incapacidade de auto arranque, necessitando de meios exteriores de auxílio;
- Necessidade de utilização de espias de suporte;
- Esforços dinâmicos acrescidos, devido ao comportamento inerentemente periódico [Castro, 2009].

### 2.3.3. CUSTOS DA ENERGIA EÓLICA

A energia eólica é das energias renováveis mais baratas sendo o seu valor determinado através da equação (2.1), quer a nível de testes, quer a nível da sua implementação final [WECA, 1995].

$$Custo_{Energia\_Eólica} = \frac{Custo_{de\_Instalação}}{Geração_{Anual}} \times taxa_{fixa} + operação \& \text{manutenção} + custo_{fuel / kWh} \quad (2.1)$$

### 2.3.4. CUSTOS AMBIENTAIS E BENEFÍCIOS

O preço que nós pagamos pela energia, inclui não só custos económicos, mas também sociais e ambientais, independentemente da tecnologia utilizada para a sua geração.

A maior objeção ao uso de turbinas eólicas prende-se com o ferimento de alguma suscetibilidade estética, mas também Eiffel teve de a enfrentar aquando da construção da torre com o seu nome, no coração de Paris, na França; assim como existiu sempre uma visão de algo que seria maléfico para a sociedade por parte de artistas (poetas, pintores, escultores, etc.), quanto à modernização industrial. Inclusivamente, na Dinamarca, existiu também uma forte oposição, por parte de agências florestais em relação ao investimento e ao progresso recorrente do uso de energia eólica.

Com o passar do tempo, foi diminuindo a oposição, quer na Europa quer nos EUA, muito graças às vantagens que iam sendo evidenciadas, nomeadamente no que concerne à estética e aos custos, pois as energias fósseis foram-se revelando muito dispendiosas comparativamente com as renováveis. Por outro lado, também o aspeto visual das fontes renováveis foi melhorando com o passar dos anos, causando menores poluições visuais e sonoras, pelo que se torna fundamental um bom planeamento dos mesmos [WECA, 1995].

### 2.3.5. IMPACTO NA FAUNA E NA FLORA

Os impactos ambientais têm uma importância relevante nos dias que correm, devido aos danos que podem ser causados quer ao nível da fauna quer da flora.

No domínio da flora, depende bastante do tipo de geografia do local onde será instalado o parque eólico. Alguns estudos apontam para perdas quantitativas mas não qualitativas.

Já no que respeita à fauna, alguns países possuem legislação que obrigam ao uso de barreiras para o impedimento da entrada de pessoas ou animais. Existem estudos que

indicam que a morte de aves não pode ser considerada significativa, à exceção de aves de espécies protegidas, como por exemplo a águia dourada, que pode causar graves impactos na cadeia biológica.

Mas outras estruturas também são responsáveis pela morte de aves como por exemplo, monumentos, faróis, torres de telecomunicações, chaminés, entre outros. Pelo que as turbinas eólicas não poderão ser consideradas como sendo um género de exterminador de aves [WECA, 1995].

### **2.3.6. IMPACTOS NAS PESSOAS**

Os impactos mais relevantes a destacar são ao nível da poluição sonora e visual, pelo que as eólicas são colocadas a uma distância superior a 100 metros (a 150 metros estima-se que se ouçam as turbinas a 45 dB). É também de salientar que poderão ocorrer acidentes de trabalho às pessoas responsáveis pela construção, manutenção e montagem (normalmente devido a erros com origem humana). Existem também impactos nos serviços de polícia e bombeiros devido à possibilidade da ocorrência de incêndios florestais e vandalismos [WECA, 1995].

### **2.3.7. IMPACTOS NO SOLO**

Para levar a cabo as ações de instalação e de manutenção será necessária a criação de acessibilidades, o que irá levar à necessidade da existência de espaço para isso. Outro senão, está relacionado com o facto de o fenómeno erosivo ter o seu processo mais acelerado do que o que seria normal. Neste aspeto, as aplicações solares (painéis solares), ocupam geralmente uma menor área, relativamente às aplicações eólicas. Um dos argumentos utilizados para a aplicação de turbinas eólicas é que, as populações que residam próximo dos parques eólicos venham a tirar proveito destes, estando assim a energia eólica a contribuir para a preservação da população rural [WECA, 1995].

### **2.3.8. BENEFÍCIOS**

A tecnologia referida possui benefícios energéticos e económicos, que tornam este tipo de geração de energia rentável pelo que é justificável a sua aplicação em diversos contextos. Podem ser referidos benefícios não só a nível de balanço energético, pois a produção de energia amortiza o seu fabrico, mas também do número de habitações que podem ser abastecidas de energia, assim como a ausência de emissões o que torna este tipo de energia

renovável limpa, pois não agrava o aquecimento global. Não podemos descartar outros fatores, como por exemplo, não estão implicados consumos de água para refrigeração, à exceção de terras áridas (deserto da Califórnia) assim como impactos sociais e externos uma vez que irão ser criados postos de trabalho em várias áreas e classes sociais.

Desta forma, prevê-se que devido às oposições iniciais serem previsíveis, o aumento genérico por todo o mundo, do uso de turbinas eólicas é espectável [WECA, 1995].

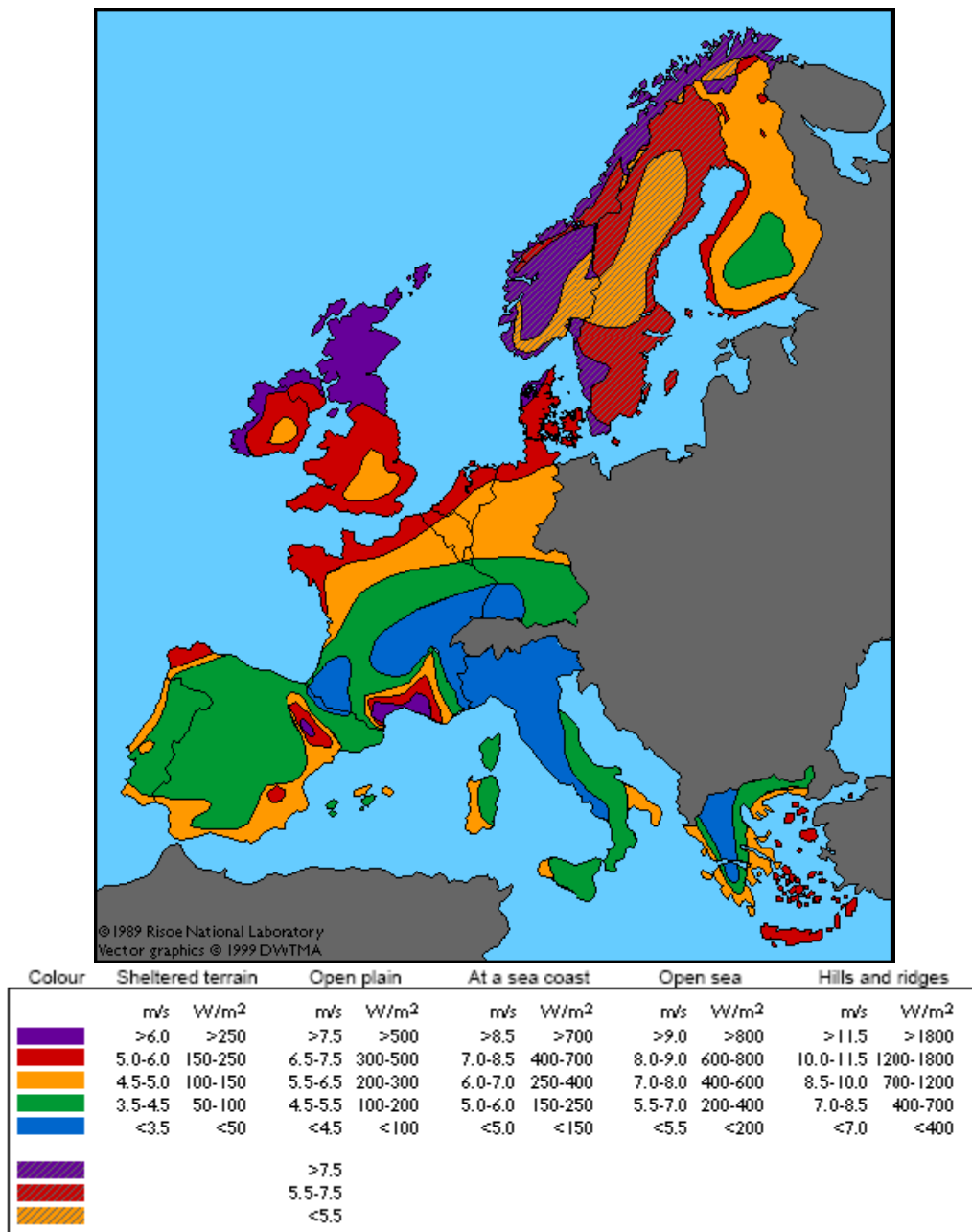
Portugal não é exceção ao uso de energia eólica, pois existem já numerosos parques eólicos espalhados por todo o país.

### **2.3.9. ESTUDOS EÓLICOS**

Uma avaliação correta do potencial eólico com vista à produção de energia elétrica baseia-se em medidas de vento efetuadas especificamente para esse efeito. Esta não era a situação à data da elaboração dos primeiros estudos. De facto, os registos existentes eram provenientes de estações meteorológicas, as quais estão associadas à medição de dados para a aviação, agricultura, previsão do tempo, mas não para avaliação do potencial eólico. Acresce que estas estações não estão normalmente localizadas nos sítios mais favorecidos do ponto de vista eólico, pelo que a extrapolação dos registos meteorológicos conduziu à avaliação por defeito do recurso.

Na Europa, uma das primeiras ações com vista à correção desta situação foi a publicação, em 1989, do Atlas Europeu do Vento (*WindAtlas*). Os dados foram obtidos a partir de estações meteorológicas selecionadas, sendo depois corrigidos, embora de forma grosseira, para ter em conta os efeitos da topografia, e finalmente, extrapolados para outras áreas.

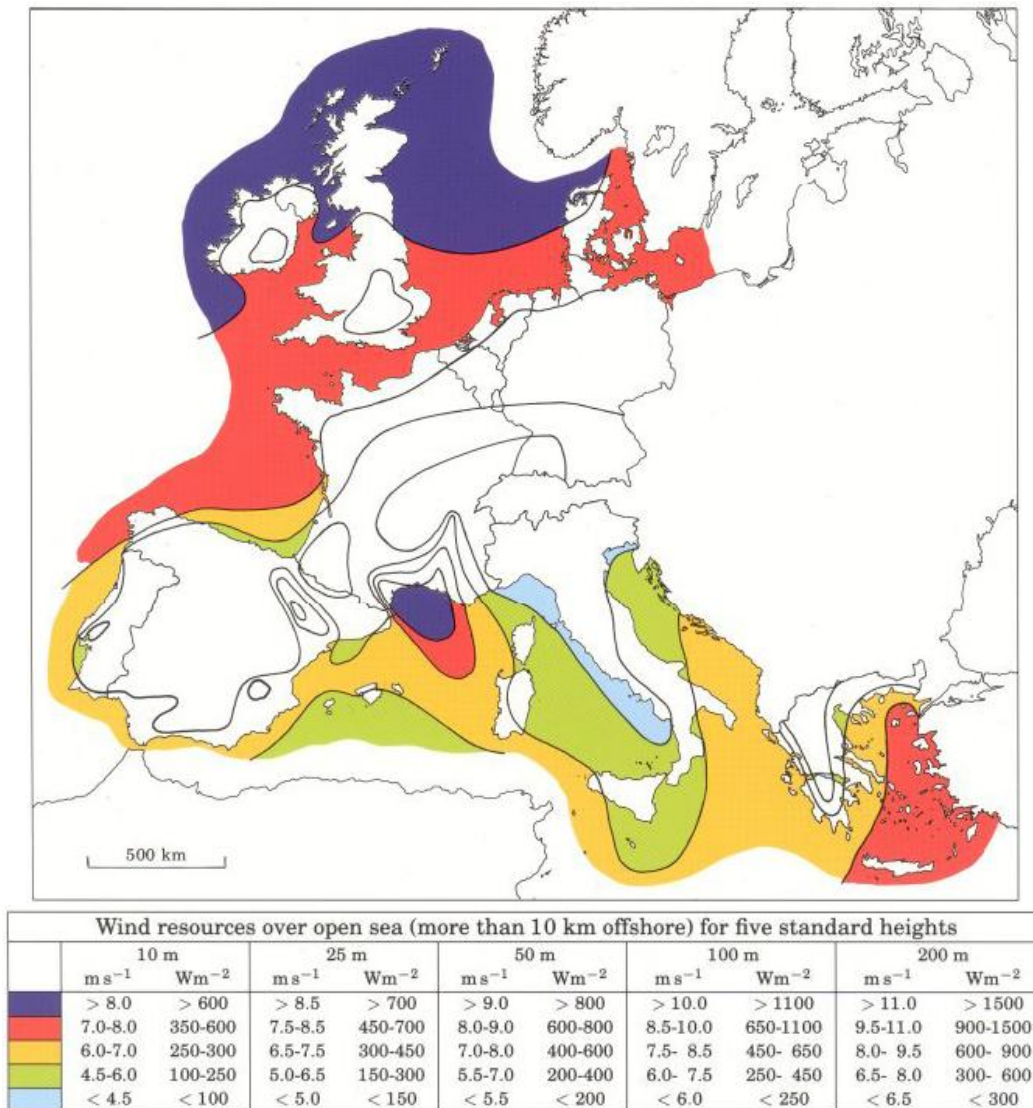
Na figura seguinte (Figura 12) podemos verificar as regiões da Europa Ocidental que são mais ou menos afetadas pelas condições climáticas, ao nível do recurso do vento, sendo observável que as regiões mais ventosas da Europa, estão localizadas no norte do Reino Unido e nas costas norte / oeste (roxo e vermelho), embora as condições topográficas locais afetem significativamente esta imagem geral. Por outro lado, o norte de Itália e também o sudeste de França não são favorecidos deste recurso eólico (azul). A zona correspondente a Portugal Continental é praticamente toda do tipo D (verde), identificando-se apenas pequenas faixas costeiras do oeste e do sul como sendo do tipo C (laranja).



**Figura 12** Recurso eólico na Europa Ocidental [Castro, 2009]

Apesar de todas as suas limitações, o Atlas Europeu de Vento representou um esforço importante para produzir um instrumento de trabalho válido de avaliação do potencial eólico com vista à produção de energia elétrica.

O recurso eólico *offshore* está mapeado no *Atlas Europeu de Vento Offshore* (WindAtlas), representado na Figura 13.



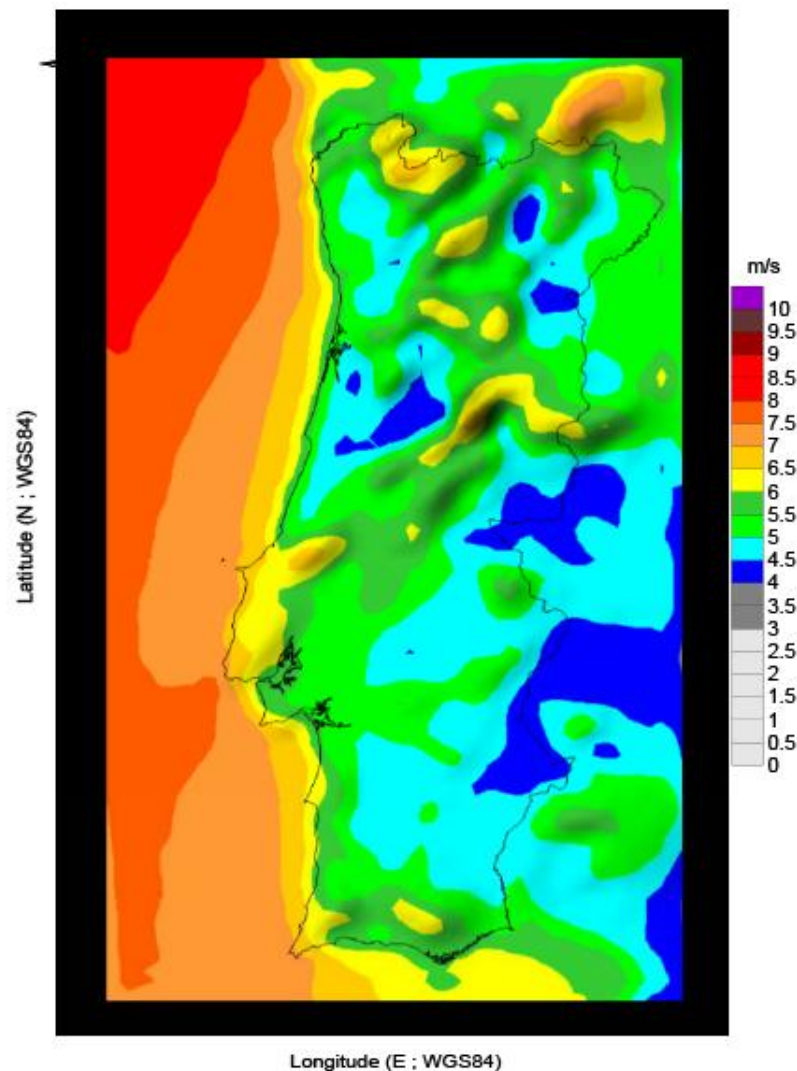
**Figura 13 Recurso eólico *offshore* na Europa Ocidental [Castro, 2009]**

Pode observar-se que o recurso mais significativo se encontra em redor das ilhas Britânicas, que pode atingir, a 100 m de altura, velocidades médias anuais superiores a 10 m/s. Isto explica o interesse manifestado pelo Reino Unido no aproveitamento deste tipo de energia eólica.

Em Portugal, o recurso eólico *offshore* apresenta valores intermédios, caracterizando-se a costa Portuguesa por velocidades médias do vento, a 100 m de altura, da ordem dos 8 m/s sendo estes valores superiores às velocidades do vento registadas em terra.

Em Portugal várias instituições, designadamente o INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, dedicaram-se também à realização sistemática de medições da velocidade do vento [Castro, 2009].

O INETI tem publicada uma versão muito completa do *Atlas Português de Vento*, de que se apresenta um exemplo na Figura 14.



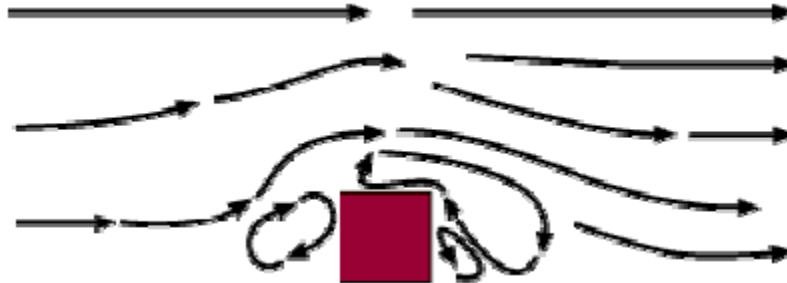
**Figura 14** O Atlas Português do vento [Castro, 2009]

As maiores velocidades médias anuais (6 a 6,5 m/s, a 60 m de altura) encontram-se junto ao litoral oeste, nomeadamente na zona centro, e em certas regiões do interior norte do país [LNEG, 2010].

### **2.3.10. OBSTÁCULOS EÓLICOS**

Os obstáculos têm uma influência significativa na redução da velocidade do vento, podem ter origem natural como árvores e formações rochosas ou artificiais como por exemplo edifícios, sendo fontes de turbulência na sua vizinhança.

A Figura 15 mostra o modo como o escoamento é afetado na área envolvente do obstáculo, podendo verificar-se que a zona turbulenta se pode estender até cerca de três vezes a altura do obstáculo, sendo mais intensa na parte de trás do que na parte da frente do obstáculo.



**Figura 15** Escoamento perante um obstáculo [Castro, 2009]

O *efeito de esteira* (Figura 16) resume-se à ocorrência na parte de trás da turbina da formação de um rasto de vento turbulento e com velocidade reduzida relativamente ao vento incidente. Uma turbina eólica produz energia mecânica a partir da energia do vento incidente, o vento que “sai” da turbina tem um conteúdo energético muito inferior ao do vento que “entrou” na turbina. De facto, na parte de trás da turbina forma-se um “trilho” de vento turbulento e com velocidade reduzida relativamente ao vento incidente. Esta figura, foi obtida injetando fumo branco no ar que passa através da turbina para mostrar a situação que se descreveu.



**Figura 16** Efeito de esteira [Castro, 2009]

### 2.3.11. POTENCIAIS LOCAIS DE INSTALAÇÃO

A potência disponível no vento aumenta com o cubo da velocidade do vento, pelo que a fixação das turbinas em locais com ventos fortes e persistentes é um fator determinante no sucesso económico da operação. A primeira etapa na escolha de locais potenciais subsiste em aplicar algumas regras do senso comum.

Os topos das montanhas são, normalmente lugares muito ventosos, tal como planaltos e planícies elevadas. Os vales são geralmente locais com pouco vento, mas esporadicamente podem ocorrer ventos mais fortes.

Os obstáculos, são motivadores pelo que a implantação das turbinas (Figura 17) dentro de um parque eólico tem de ser efetuada de modo criterioso. É habitual intervalar as turbinas de uma distância entre cinco e nove diâmetros na direção preferencial do vento e entre três e cinco diâmetros na direção perpendicular. Mesmo tomando estas medidas, a experiência mostra que a energia perdida devido ao efeito de esteira é de cerca de 5%.

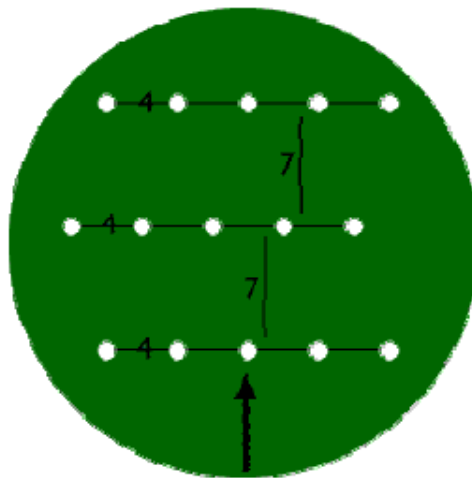


Figura 17 Implantação de um parque eólico [Castro, 2009]

Uma condição necessária para a apropriação da energia contida no vento é a existência de um fluxo permanente e razoavelmente forte de vento. As turbinas modernas são projetadas para atingirem a potência máxima para velocidades do vento da ordem de 10 a 15 m/s. A energia disponível para uma turbina eólica, é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante  $u$  (m/s). Na unidade de tempo, aquela coluna de ar, ao atravessar a secção plana transversal  $A$  (m<sup>2</sup>) do rotor da turbina,

desloca uma massa  $\rho Au$  (kg/s), em que  $\rho$  é a massa específica do ar ( $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ , em condições de pressão e temperatura normais).

A potência disponível no vento ( $W$ ) é, então, proporcional ao cubo da velocidade do vento (equação (2.2)):

$$P_{disp} = \frac{1}{2}(\rho Au)u^2 = \frac{1}{2}\rho Au^3 \quad (2.2)$$

Na equação (2.2) pode ser verificado que a potência disponível é fortemente dependente da velocidade do vento: quando esta duplica, a potência aumenta oito vezes, mas duplicando a área varrida pelas pás da turbina, o aumento é só de duas vezes. Por outro lado, se a velocidade do vento desce para metade, a potência reduz-se a 12,5%. Tudo isto explica a importância crítica da colocação das turbinas em locais com velocidades do vento elevadas, para a obtenção do sucesso económico dos projetos de energia eólica.

A equação (2.2) indica a potência disponível no vento na ausência de turbina. Esta potência não pode ser integralmente convertida em potência mecânica no veio da turbina, uma vez que o ar, depois de atravessar o plano das pás, tem de sair com velocidade não nula. A aplicação de conceitos da mecânica de fluídos permite demonstrar a existência de um máximo teórico para o rendimento da conversão da energia cinética do vento: o seu valor é aproximadamente 59,3% e é conhecido por *Limite de Betz*. O rendimento efetivo da conversão numa turbina eólica depende da velocidade do vento e é dado pela equação (2.3):

$$C_p' = \frac{P_m}{P_{disp}} \quad (2.3)$$

em que  $P_m$  é a potência mecânica disponível no veio da turbina. Embora a definição de  $C_p$  seja a dada pela equação (2.3), os fabricantes de aerogeradores têm por hábito incluir o rendimento do gerador elétrico no valor de  $C_p$ , pelo que a expressão usada na prática é:

$$C_p(u) = \frac{P_e}{P_{disp}} \quad (2.4)$$

em que  $P_e$  é a potência elétrica fornecida aos terminais do gerador. Não está normalizada a designação a dar ao rendimento expresso pela equação (2.3) ou pela equação (2.4). São comuns as designações de *coeficiente de potência*, *fator de aproveitamento* ou *rendimento aerodinâmico*. Na prática, a terminologia mais usada é mesmo  $C_p$ .

### 2.3.12. ELEMENTOS DE UM GRANDE AEROGERADOR

Depois da legenda seguinte, segue-se a descrição dos vários elementos constituintes de um aerogerador típico (Figura 18).

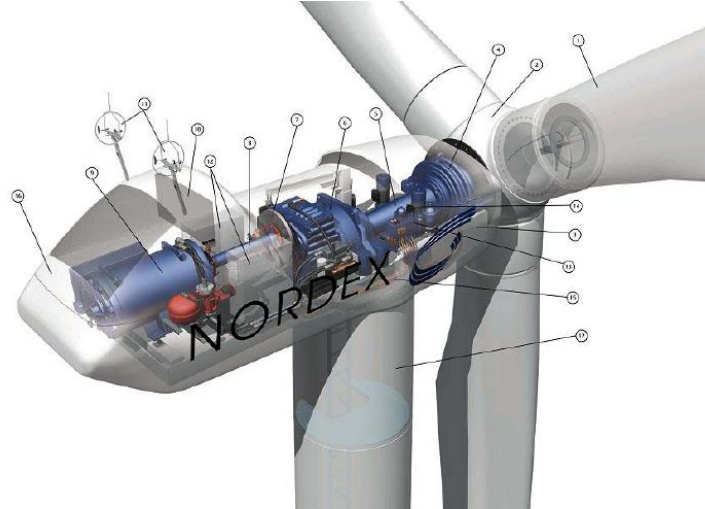


Figura 18 Esquema de uma turbina eólica típica “Nordex” [Castro, 2009]

#### Legenda:

- 1 - Pás do rotor
- 2 - Cubo do rotor
- 3 - Cabina
- 4 - Chumaceira
- 5 - Veio do rotor
- 6 - Caixa de velocidades
- 7 - Travão de disco
- 8 - Veio do gerador
- 9 - Gerador
- 10 - Radiador de arrefecimento
- 11 - Anemómetro e sensor de direção
- 12 - Sistema de controlo
- 13 - Sistema hidráulico
- 14 - Mecanismo de orientação direcional
- 15 - Chumaceira mecanismo de orientação direcional
- 16 - Cobertura da cabina
- 17 – Torre

**Rotor:** O projeto das pás do rotor, no qual a forma da pá e o ângulo de ataque em relação à direção do vento têm uma influência determinante, beneficiou do conhecimento da tecnologia das asas dos aviões, que apresentam um funcionamento semelhante. Em relação à superfície de ataque do vento incidente nas pás, o rotor pode ser colocado a montante ou a jusante da torre. A opção *upwind*, em que o vento ataca as pás pelo lado da frente, generalizou-se devido ao facto de o vento incidente não ser perturbado pela torre. A opção *downwind*, em que o vento ataca as pás pelo lado de trás, permite o auto alinhamento do rotor na direção do vento, mas tem vindo a ser progressivamente abandonada, pois o escoamento é perturbado pela torre antes de incidir no rotor.

Define-se solidez como sendo a razão entre a área total das pás e a área varrida pelas mesmas. Se o diâmetro e a solidez das pás forem mantidos constantes, o rendimento aumenta com o número de pás: isto acontece, porque diminuem as chamadas perdas de extremidade. O acréscimo na energia capturada pelo vento está estimado em cerca de 3 a 5% quando se passa de duas para três pás, mas esta percentagem vai tornando-se progressivamente menor à medida que se aumenta o número de pás. Esta razão motivou que a grande maioria das turbinas em operação apresente rotores com três pás, muito embora a solução com duas pás configure benefícios relacionados com a diminuição de peso e de custo.

Por outro lado, é necessário que o cubo do rotor (local de fixação das pás) possa baloiçar, isto é, que apresente um ângulo de inclinação relativamente à vertical, de forma a acomodar os desequilíbrios resultantes da passagem das pás em frente à torre. Esta questão assume relevância acrescida no desenho do rotor de duas pás (Figura 19).

Os rotores de uma só pá foram objeto de investigação, tendo sido construídos alguns protótipos; contudo, não conheceram desenvolvimento comercial, dada a sua natureza inerentemente desequilibrada.



**Figura 19** Pormenor de um rotor com duas pás “DanishAssoc” [Castro, 2009]

A vida útil do rotor está relacionada com os esforços a que fica sujeito e com as condições ambientais em que se insere. A seleção dos materiais usados na construção das pás das turbinas é, pois, uma operação delicada: atualmente, a escolha faz-se entre a madeira, os compostos sintéticos e os metais. A madeira é o material de fabrico de pás de pequena dimensão (da ordem de 5 m de comprimento). Mais recentemente, a madeira passou a ser empregue em técnicas avançadas de fabrico de materiais compósitos de madeira laminada. Atualmente, há alguns fabricantes a usar estes materiais em turbinas de 40 m de diâmetro.

Os compostos sintéticos constituem os materiais mais usados nas pás das turbinas eólicas, nomeadamente, plásticos reforçados com fibra de vidro. Estes materiais são relativamente baratos, robustos, resistem bem à fadiga, mas, principalmente, são facilmente moldáveis, o que é uma vantagem importante na fase de fabrico. Sob o ponto de vista das propriedades mecânicas, as fibras de carbono constituem a melhor opção. Contudo, o seu preço elevado é ainda um obstáculo que se opõe a uma maior difusão.

No grupo dos metais, o aço tem sido usado, principalmente nas turbinas de maiores dimensões. Contudo, é um material denso, o que o torna pesado. Em alternativa, alguns fabricantes optaram por ligas de alumínio que apresentam melhores propriedades mecânicas, mas têm a desvantagem de a sua resistência à fadiga se deteriorar rapidamente.

A tendência atual aponta para o desenvolvimento na direção de novos materiais compósitos híbridos, de forma a tirar partido das melhores características de cada um dos componentes, designadamente sob o ponto de vista do peso, robustez e resistência à fadiga.

**Cabina:** Na cabina (também designada por *nacelle*) estão alojados, entre outros equipamentos, o veio principal, o travão de disco, a caixa de velocidades (quando existe), o gerador e o mecanismo de orientação direcional.

O veio principal de baixa rotação transfere o binário primário do rotor para a caixa de velocidades. Neste veio estão montadas as tubagens de controlo hidráulico dos travões aerodinâmicos (se forem necessários). Em situações de emergência devidas a falha no travão aerodinâmico (*spoiler*) ou para efetuar operações de manutenção é usado um travão mecânico de disco. Este travão tanto pode estar situado no veio de baixa rotação como no veio de alta rotação, após a caixa de velocidades. Na segunda opção, o travão é menor e mais barato, pois o binário de travagem a fornecer é menor. Contudo, na eventualidade de uma falha na caixa de velocidades, não há controlo sobre o rotor.

A caixa de velocidades (quando existe) é necessária para adaptar a frequência do rotor da turbina, tipicamente da ordem de 0,33 Hz (20 rpm) ou 0,5 Hz (30 rpm), à frequência do gerador, isto é, da rede elétrica de 50 Hz.

O gerador converte a energia mecânica disponível no veio de alta rotação em energia elétrica. A ligação mais flexível do gerador assíncrono, permitida pelo escorregamento, tem levado à maior parte dos fabricantes a escolhê-lo como equipamento de conversão mecano-elétrica; já a ligação rígida característica do gerador síncrono não se adapta bem às variações do vento, pelo que este conversor só é usado em sistemas de velocidade variável.

É ainda necessário que o rotor fique alinhado com a direção do vento, de modo a extrair a máxima energia possível. Para executar esta função, existe o mecanismo de orientação direcional, constituído essencialmente por um motor, o qual, em face da informação recebida de um sensor de direção do vento, roda a *nacelle* e o rotor até que a turbina fique adequadamente posicionada.

**Torre:** A torre suporta a *nacelle* e eleva o rotor até uma cota em que a velocidade do vento é maior e menos perturbada do que junto ao solo.

As torres modernas podem ter sessenta e mais metros de altura, pelo que a estrutura tem de ser dimensionada para suportar cargas significativas, bem como para resistir a uma exposição em condições naturais ao longo da sua vida útil, estimada em cerca de vinte anos.

No cimo da cabina está montado um anemómetro e o respetivo sensor de direção. As medidas da velocidade do vento são usadas pelo sistema de controlo para efetuar o controlo da turbina, nomeadamente, a entrada em funcionamento a partir da velocidade de aproximadamente 5 m/s, e a paragem para ventos superiores a cerca de 25 m/s. A informação da direção do vento é usada como entrada do sistema de orientação direcional.

Os fabricantes têm-se dividido entre dois tipos de torres: tubulares Figura 20 a) “DanishAssoc” e entrelaçadas Figura 20 b) “Tu-Berlin”.



a)



b)

**Figura 20 Tipos de torres eólicas [Castro, 2009]**

Para fabricar as torres tubulares pode usar-se aço ou betão, sendo, normalmente os diversos troços fixados no local com uma grua. Estas torres são mais seguras para o pessoal da manutenção, pois podem usar uma escada interior para aceder à plataforma da *nacelle*.

As torres entrelaçadas são mais baratas, as fundações são mais ligeiras e o efeito de sombra da torre é atenuado; contudo, têm vindo a ser progressivamente abandonadas especialmente devido a questões ligadas com o impacto visual [Castro, 2009].

### **2.3.13. FORÇAS ATUANTES NAS PÁS DO ROTOR E CONTROLO DE POTÊNCIA**

A geometria das pás do rotor, cuja secção reta tem a forma de um "perfil alar", determina a quantidade de energia que é extraída a cada velocidade do vento. Na Figura 21 podemos conferir as várias forças que irão originar o movimento das pás associadas ao rotor.

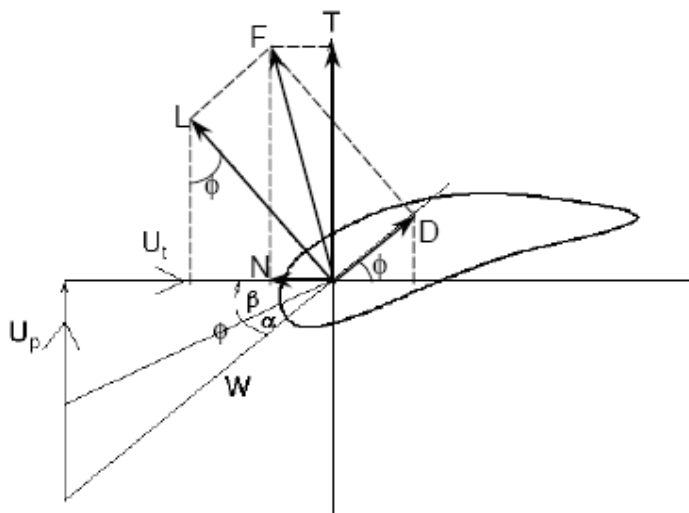


Figura 21 Forças atuantes na pá [Castro, 2009]

Legenda:

W-velocidade relativa do vento;

$U_p$ - velocidade do vento;

$U_t$ -velocidade tangencial do vento;

L -sustentação;

T - binário do motor;

D- arrastamento;

$\alpha$  - ângulo de ataque;

$\beta$  - ângulo de passo;

$\varphi$  - ângulo de escoamento;

N - movimento da pá;

F- Força resultante

O vetor velocidade relativa do vento  $W$  que atua o elemento de pá, resulta de duas componentes: a *velocidade do vento*  $U_p$  e a *velocidade tangencial* da pá  $U_t$ .

O ângulo de ataque  $\alpha$ , é definido como sendo o ângulo entre a linha que une os bordos de entrada e de saída do perfil (linha de corda) e a velocidade relativa. O ângulo de passo  $\beta$ , é o ângulo entre o plano de rotação da pá e a linha de corda. O ângulo do escoamento  $\varphi$  (equação (2.5)), é dado por:

$$\varphi = \alpha + \beta \quad (2.5)$$

O vetor *força*  $F$  pode ser decomposto em duas componentes: uma, atuando na mesma direção da velocidade relativa, designa-se por *arrastamento*  $D$ ; a outra, é perpendicular e designa-se por *sustentação*  $L$ . Pode, igualmente, ser decomposto na direção do plano de

rotação e na direção perpendicular, obtendo-se a componente que contribui para o movimento da pá N, e a componente que contribui para o binário motor T.

Relativamente ao esquema da Figura 21, o ângulo de passo  $\beta$  é constante [Castro, 2009].

A estratégia de controlo de potência assenta nas características aerodinâmicas das pás do rotor que são projetadas para entrar em perda a partir de uma certa velocidade do vento.

Uma vez que as pás estão colocadas a um dado ângulo de passo fixo, quando o ângulo de ataque aumenta para além de um certo valor, a componente de sustentação diminui, ao mesmo tempo que as forças de arrastamento passam a ser dominantes. Nestas condições, a componente T da força que contribui para o binário diminui: diz-se, neste caso, que a pá entrou em perda (de sustentação). Note-se que o ângulo de ataque aumenta quando a velocidade do vento aumenta, porque o rotor roda a uma velocidade constante.

As turbinas “*pitch*” têm a possibilidade de rodar a pá em torno do seu eixo longitudinal, isto é, variam o ângulo de passo das pás,  $\beta$ .

Um gerador eólico com velocidade variável não pode ser diretamente interligado com um sistema de energia elétrica caracterizado por possuir uma frequência constante, pelo que se recorre a sistemas de conversão corrente alternada / corrente contínua / corrente alternada (CA/CC/CA) de forma a realizar esta ligação.

Os conversores eólicos equipados com turbinas do tipo “*pitch*” e sistemas de conversão CA/CC/CA têm ainda a vantagem de, na zona de controlo de potência, exibirem uma resposta mais rápida, já que o sistema de conversores eletrónicos possui constantes de tempo inferiores às exibidas pelo sistema de controlo do passo das pás do rotor. O sistema de conversão CA/CC/CA atua em primeiro lugar de forma a controlar a potência, sendo o controlo fino desta assegurada pelo controlador do passo das pás do rotor.

Face a perturbações na rede, os sistemas de controlo são inibidos por sistemas de proteção do equipamento elétrico e eletrónico. No caso dos geradores eólicos interligados através de conversores CA/CC/CA, a ocorrência de perturbações na rede ocasiona a interrupção do seu funcionamento, de forma a proteger os conversores das elevadas intensidades de corrente que se podem verificar. No caso dos geradores eólicos diretamente ligados à rede, a interrupção do normal funcionamento é condicionada pelos valores elevados de

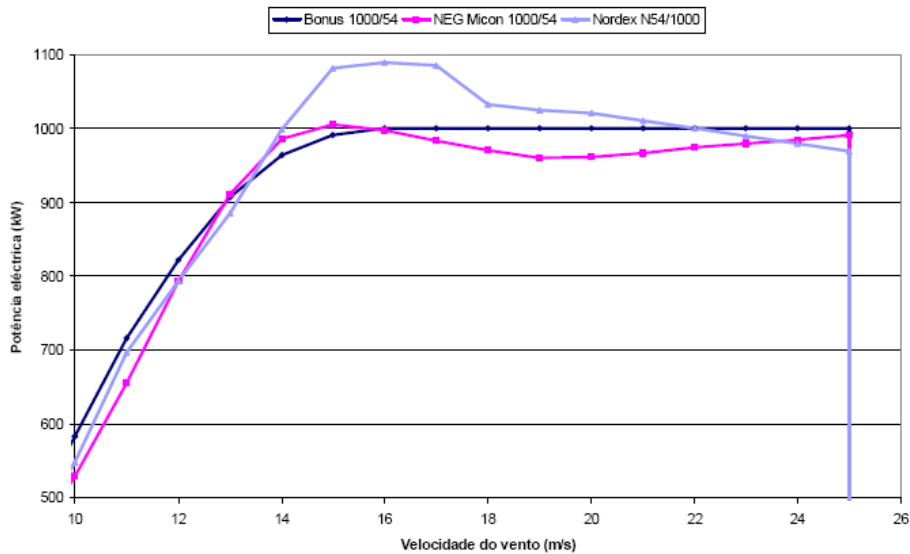
intensidade de corrente e do binário que se podem verificar no período pós perturbação. Estes sistemas de proteção têm como objetivo proteger o equipamento elétrico e eletrónico e não a turbina.

O sistema de proteção que especificamente diz respeito à turbina é o de proteção de sobre velocidade, que protege o equipamento no caso de rejeição de carga.

Relativamente às vantagens e dos inconvenientes das configurações das turbinas, podem ser referidos:

- A favor da regulação por “*stall*” joga, principalmente, a sua grande simplicidade devido à ausência de mais partes em movimento; por isso é também mais barata. No entanto, a sua implementação faz apelo a complicados métodos de cálculo aerodinâmico para definir o ângulo de ataque para o qual a pá entra em perda. Este aspeto é crucial para o desempenho deste método.
- A favor da solução “*pitch*” jogam, por exemplo, o bom controlo de potência, para todas as gamas de variação da velocidade do vento.
- Por outro lado, a variação do ângulo de passo permite também a redução dos esforços de fadiga com vento muito forte porque, nessa situação, a pá apresenta uma menor superfície frontal em relação ao vento.

Na Figura 22 comparam-se as curvas de potência de turbinas eólicas “*stall*” e “*pitch*”: é visível que o sistema de variação do passo permite o controlo de potência muito mais fino.



**Figura 22** Curvas de potência *pitch* (Bonus) e *stall* (NEG Micon e Nordex) [Castro, 2009]

No entanto, o grande acréscimo de complexidade, e o correspondente aumento de custo, que esta solução acarreta são inconvenientes que têm de ser ponderados.

Uma diferença fundamental entre as turbinas *stall* e *pitch* relaciona-se com a capacidade de auxílio nos processos de arranque e paragem.

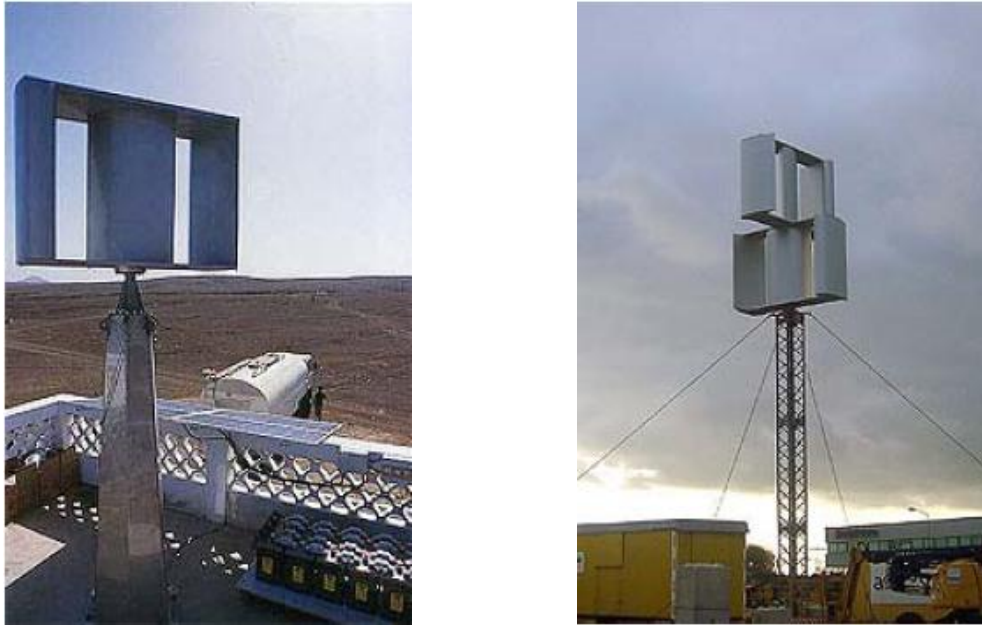
No arranque, quando a velocidade do vento é baixa, a turbina de pás fixas não tem binário de arranque suficiente. Torna-se necessário dispor de um motor auxiliar de arranque ou, então, usar o próprio gerador a funcionar como motor para trazer o rotor até à velocidade adequada. No processo de paragem não é possível colocar as pás na posição ideal para esse efeito, a chamada posição de bandeira, pelo que é exigido um sistema complementar de travagem por meios aerodinâmicos, por exemplo, deflexão de *spoilers*.

As turbinas *pitch* permitem que o processo de arranque seja assistido, porque o ângulo de passo pode ser variado de modo a conseguir um embalamento do rotor até à velocidade de rotação nominal.

A travagem também é melhorada, porque se o passo das pás for tal que  $\phi = 90^\circ$  (posição de bandeira), o rotor move-se lentamente, e o sistema de travagem aerodinâmica pode ser dispensado.

### 2.3.14. MICROGERADORES EÓLICOS

Um campo que apresenta grandes potencialidades de desenvolvimento é o das aplicações de pequena potência (máximo de alguns kW) em ambiente urbano, ligados à rede, ou em ambiente rural, em sistema isolado (Figura 23).



**Figura 23** Microgeradores eólicos [Castro, 2009]

Por exemplo, um microgerador eólico de 1 kW montado numa torre de 7 m tem um comprimento de pás de 1,15 m e uma massa de 130 kg (Ropatec). Em Portugal foi desenvolvido, num projeto liderado pelo INETI, que consiste num microgerador eólico – TURBAN (Figura 24) – com uma potência de 2,5 kW.



**Figura 24 Microgerador eólico Português [Castro, 2009]**

Em 1998 foi efetuado um primeiro estudo sobre esta área de pequenas turbinas eólicas (Figura 25), que incidiu sobre 22 fabricantes destes aerogeradores de 11 países, em que os equipamentos em causa possuíam potência inferior a 12 Watts e diversificavam-se entre 50 modelos. Na altura, as conclusões que se destacavam eram sobretudo o facto de não existir um mercado real interessado mas já se perspectivava um futuro prometededor quanto ao surgimento desse mercado. As turbinas mais comuns eram as de três lâminas e com travão mecânico, de eixo horizontal e gerador síncrono de ímanes permanentes (*permanent magnet generator-PMG*). Ainda se concluiu que era necessário desenvolver mecanismos de modo a reduzir os custos inerentes a esta tecnologia e ao mesmo tempo aumentar a sua consistência.



**Figura 25 Pequeno aerogerador [CIEMAT, 2007]**

Por esta altura, via-se esta solução tecnológica como pouco madura e longe de permitir competitividade económica no mercado.

Passados sete anos, corria o ano de 2005, o estudo recaiu sobre 60 fabricantes através de 160 modelos de aerogeradores de 21 países, em que os equipamentos em causa possuíam potência inferior a 50 Watts.

A análise realizada cobriu aspetos como características técnicas, ligação em rede das turbinas eólicas, eólicas isoladas, custos, garantias e certificações fornecidas. Neste estudo foi concluído que a grande parte dos aerogeradores fabricados não possuía qualquer tipo de certificado de algum tipo de norma como por exemplo desempenho de potência (norma IEC 61400-12-1), técnicas de medição de ruído acústico (norma IEC 61400-11 Ed2), exigência de projeto para pequenas eólicas (norma IEC 61400 2 Ed2), teste de durabilidade (norma IEC WT01), teste de segurança e funcionalidade (norma IEC WT01). Todas estas falhas se deviam, pelo que foi apurado, à complexidade que os relatórios apresentavam para os utilizadores finais, assim como ao elevado custo de implementação dos testes e também os testes não permitirem apresentar com fiabilidade o complexo comportamento das eólicas em estudo. Como solução a este problema começou-se a trabalhar em relatórios de certificação mais fiáveis e simples. Também nesta altura estava identificada a falta de pequenas eólicas da gama entre 20 e 100 kW. Mesmo ao nível da certificação, chegou-se à conclusão que essa mesma certificação não se adequava às necessidades das pequenas turbinas eólicas.

Então, após estas conclusões, através de centros de investigação, tornou-se possível a implementação de um sistema de certificação mais funcional que o existente, assim como o melhoramento das tecnologias bem como a apresentação dessas à comunidade.

Em Espanha, no CIEMAT (*Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas*), (Figura 26), integrante do ministério da Educação e da Ciência, foi criado um centro em que é possível realizar testes operacionais a pequenas eólicas, que se designam por *Small Wind Test Facility* (SWTF). Enquanto que as eólicas de grande porte têm já sobre elas grandes estudos efetuados, na realidade o mesmo não se passa com os pequenos aerogeradores. O objetivo principal do SWTF é testar várias séries de pequenas turbinas (de potência inferior a 100kW), por um período de tempo razoável de modo a que seja possível aferir sobre o desempenho e a segurança dos elementos em estudo.



**Figura 26 Centro CIEMAT [CIEMAT, 2007]**

A IEA (*International Energy Agency*) estabeleceu no ano de 2006, numa conferência que ocorreu em Estocolmo, que era urgente a criação de etiquetagem adequada (Figura 27) para as pequenas turbinas eólicas. E chegou-se a um consenso que levou ao aparecimento de um rótulo que atesta parâmetros como ruído, desempenho energético, segurança, etc.

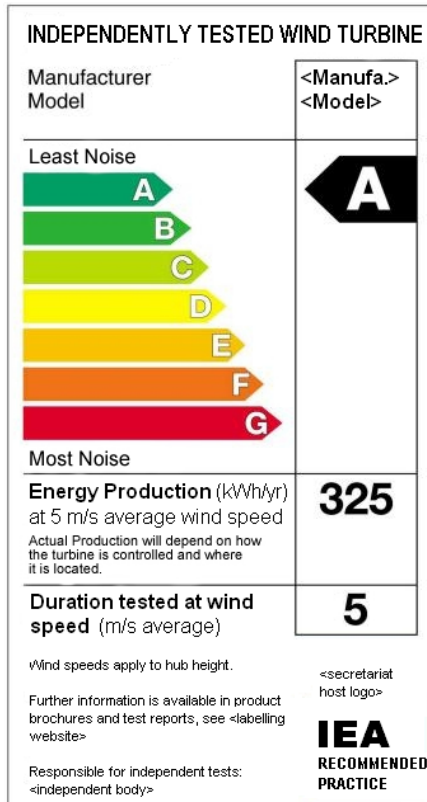


Figura 27 Etiqueta de desempenho energético [CIEMAT, 2007]

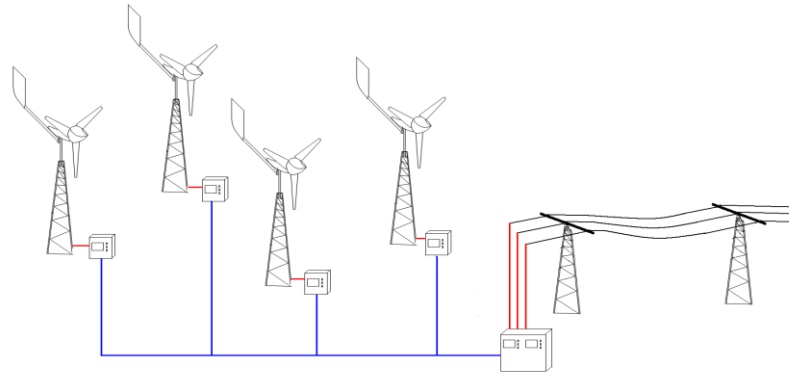
Depois destes parâmetros estarem devidamente especificados é possível optar pelos tipos de aerogeradores que melhor se adequam aos mais diversos locais e diferentes aplicações (Figura 28). Como exemplo em ambientes domésticos, os sistemas híbridos podem ser implementados recorrendo à integração de painéis fotovoltaicos, quer isoladamente ou até mesmo com instalação em rede, em determinadas localidades.



**Figura 28 Diversas aplicações de pequenas turbinas eólicas [CIEMAT, 2007]**

Foram encontrados motivos que justificam o uso desta tecnologia em ambiente urbano, desde as suas características intrínsecas como por exemplo serem silenciosas, pois não apresentam perturbações e são bastante resistentes, assim como o impacto visual é mínimo pois a altura máxima é de 10 metros e as pás são de tamanho consideravelmente inferior às das eólicas de porte superior. Possui bom desempenho com ventos fracos e é fácil a sua aquisição e instalação. As perdas por efeito de Joule são baixas e é um equipamento bastante seguro.

Existe uma redução dos custos de potência e das perdas de energia nos cabos através, da aplicação de um barramento CC (Figura 29).



**Figura 29 Barramento CC [CIEMAT, 2007]**

Em Espanha, a atual regulação na área das pequenas turbinas eólicas é a seguinte:

- São consideradas de pequenas turbinas eólicas aquelas que produzam potência abaixo de 100kW (sendo atualmente utilizadas para abastecimento de energia em locais remotos);
- Os custos de instalação estão cinco vezes acima das turbinas eólicas de 500 kW.
- Apresentam um elevado potencial para aplicações que requeiram a sua instalação em rede;

Quanto a aplicações de ligação em rede, não existe uma regulamentação específica:

- As pequenas eólicas estão incluídas na gama de produção de energia a partir do vento;
- A condição tecnológica é diferente comparando com as médias e grandes eólicas (a partir de 500 kW);
- Possibilidade de hibridação principalmente com painéis fotovoltaicos;
- Ligação em rede de baixa tensão.

A burocracia é semelhante à que é aplicada em grandes parques eólicos.

Em relação a aplicações isoladas:

- Falta de fundos governamentais e das instituições locais;

- A burocracia é semelhante à usada em grandes parques eólicos;

[CIEMAT, 2007].

## 2.4. ENERGIA SOLAR

A célula fotovoltaica é o elemento básico do gerador fotovoltaico, pois é nela que se dá a conversão da energia radiante do sol em energia elétrica. Geralmente apresentam a forma de pequenos discos ou retângulos e são fabricadas em grande escala. Conforme os materiais utilizados e de acordo com a área apresentam características elétricas específicas. São extremamente frágeis e geram individualmente uma quantidade de energia muito pequena, geralmente em tensões muito baixas da ordem de 0,5 V [Alvarenga, 2000]. É também um tipo de energia renovável que tem sido implementada e aceita por todo o mundo.

Este tipo de tecnologia utiliza células semicondutoras (*wafers*), com alguns centímetros quadrados. Basicamente trata-se de uma área polarizada p-n, com a junção próxima da superfície. Cada célula converte a luz solar diretamente em eletricidade de corrente contínua. Várias destas células são montadas num único módulo de forma a poder gerar a energia necessária para um determinado sistema.

Em 1999 o custo ainda era considerado elevado, não sendo os módulos ligados à rede, e sendo apenas utilizados para fins particulares e isolados, como por exemplo em locais isolados e de difícil acesso. É também um tipo de energia renovável que tem sido implementada e aceita por todo o mundo.

Em 1995, 40% dos painéis solares instalados por todo o mundo eram produzidos nos EUA por empresas como a *Siemens Solar Industries* e a *Solarec Corporation*. O centro aquático de Atlanta (um dos palcos dos Jogos Olímpicos de 1996) tem o seu telhado (345 kW) coberto de painéis fotovoltaicos que conseguem produzir energia para abastecer 70 habitações, permitindo desta forma poupar a emissão de 330 toneladas de CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono), 3,3 toneladas de SO<sub>2</sub> (Dióxido de Enxofre) e 1,2 toneladas de NO (Óxido Nítrico). Também nos jogos Olímpicos de Sidney (em 2000), foram construídos painéis fotovoltaicos capazes de produzirem 500 kW [WSPS, 1999].

#### 2.4.1. BENEFÍCIOS

São várias as motivações que levam à aplicação desta tecnologia. Por exemplo, circunstâncias como a rápida conceção e instalação, o fácil transporte em módulos, não causa poluição sonora e possui grande capacidade energética. Ao longo dos anos, a evolução tecnológica permitiu que os consumos na produção de painéis fotovoltaicos fossem cada vez menores. A inclusão de painéis solares em edifícios, é um dos modos de instalação mais visíveis nos dias de hoje. Na Alemanha, existem por exemplo, aplicações que cobrem edifícios com painéis solares numa área de 140 m<sup>2</sup>, gerando potências na ordem dos 7000 kWh/ano. Tendo em conta uma eficiência de 115% (330 painéis) com ângulos de orientação de 90° e em rede, podemos então definir, através da equação (2.6), a eficiência de conversão de energia por [WSPS, 1999]:

$$\eta = \frac{\text{Energia\_Eléctrica\_produzida}}{\text{Luz\_Solar\_Incidente\_na\_Célula}} \quad (2.6)$$

#### 2.4.2. TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A célula fotovoltaica utiliza o “efeito fotovoltaico” para gerar eletricidade. Baseia-se na propriedade de certos materiais existentes na natureza, denominados semicondutores, de possuírem uma banda de valência totalmente preenchida com eletrões e uma banda de condução totalmente vazia a temperaturas muito baixas. Quando os fotões da luz solar na faixa do espectro de radiação visível incidem sobre este material excitam eletrões da banda de valência enviando-os à banda de condução. A energia presente nos fotões é transferida para os átomos libertando estes eletrões com alta energia.

Uma barreira consegue impedir que estes eletrões retornem para a sua posição anterior podendo-se direcioná-los para um circuito elétrico, gerando assim uma tensão e uma corrente elétrica contínua [Alvarenga, 2000].

Existem vários tipos de conceção das células integrantes de painéis fotovoltaicos, como por exemplo:

- Células cristalinas (são mais utilizadas), “*Single Crystalline Silicon*”, são produzidas em *wafers* sendo estas cortadas em células retangulares, de forma a maximizar o número de células que podem ser montadas em conjunto formando um painel retangular. Possui um custo elevado.

- “*Polycrystalline and Semicrystalline*”, é um método rápido e de baixo custo relativamente ao anteriormente mencionado, mas a sua eficiência de conversão de energia é inferior.
- “*Thin Films*”, consiste numa liga depositada em vidro ou cerâmica.

De referir ainda outros tipos de processos aplicados nesta tecnologia, como o “*Amorphous Silicon*”, o “*Spherical*”, o “*Concentrated Cells*” com lentes que têm por objetivo concentrar os raios solares na célula, o que representa um acréscimo de custos [WSPS, 1999].

As células de filmes finos constituem um grande campo de pesquisas para redução de custos. O grande objetivo é desenvolver técnicas alternativas ao silício mono e policristalino que tenham custos menores. A estratégia é usar pouco material, diminuir o consumo de energia e reduzir a complexidade dos processos permitindo a produção em larga escala.

Os principais tipos de células atualmente em pesquisa são as de silício amorfo, as de disseleneto de cobre e índio, as de telureto de cádmio e as de arseneto de gálio. Dos recursos financeiros canalizados para as pesquisas, cerca de 30% destinam-se ao disseleneto de cobre e índio, 22% ao telureto de cádmio, 15% ao silício mono e policristalino, 11% ao arseneto de gálio e 10% ao silício amorfo. O restante é empregado noutras pesquisas relativas ao módulo e aos sistemas.

Várias dessas tecnologias, principalmente o silício amorfo, já se encontram em fase comercial com produtos disponíveis e já instalados. Será preciso ainda algum tempo para se estabelecer o nível de fiabilidade das mesmas [Alvarenga, 2000].

### **2.4.3. MÓDULO FOTOVOLTAICO**

O módulo fotovoltaico é a unidade básica de um sistema de geração de eletricidade com origem fotovoltaica. Consiste numa estrutura montada em quadro, geralmente de alumínio, e é composto por um conjunto de células fotovoltaicas ligadas eletricamente entre si, em paralelo ou em série, cobertas por um encapsulamento que protege as mesmas assim como as suas ligações da ação do tempo e dos eventuais impactos. As células são cobertas, do lado exposto ao sol, por uma cobertura transparente, normalmente vidro. Na parte traseira são revestidas por um material plástico, normalmente EVA ou PVB. Todos estes revestimentos, em conjunto com o quadro de alumínio, resultam numa estrutura rígida e

resistente ao manejo e às intempéries. É importante que as células fiquem protegidas da humidade do ar para que possam manter as suas características ao longo da sua vida útil.

Na saída de cada módulo tem-se a soma da energia elétrica produzida por cada célula, resultando num montante energético mais significativo e já adaptado às características elétricas com que se pretende trabalhar. O número de células em série determina as características da tensão elétrica de saída do módulo. Usualmente um módulo típico utilizado para carregar uma bateria de 12 V apresenta de 30 a 36 células em série.

Para pequenos sistemas de telecomunicações, como um telefone, basta um módulo fotovoltaico. Instalações de telecomunicações maiores exigem o uso de muitos módulos, que ligados fisicamente e eletricamente numa mesma estrutura formam um painel fotovoltaico. Cada painel é ligado de forma a fornecer a tensão adequada ao sistema, que pode ser de 12, 24, 48 V ou outra projetada [Alvarenga, 2000].

#### **2.4.4. CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Quando o módulo está exposto ao Sol, gera energia elétrica em corrente contínua, com uma intensidade dependente do nível da radiação solar e da temperatura ambiente. Dentro dos vários parâmetros elétricos característicos de um módulo, os mais importantes são a corrente e a tensão na saída, que revelam a sua capacidade de gerar energia para o sistema.

A capacidade de um módulo fotovoltaico (Figura 30) é obtida pela sua potência de pico em Watt ( $W_p$ ) que é dado pelo produto da tensão pela corrente.

Através de um breve exemplo podemos observar que a condição padrão para a determinação desta potência é definida para um módulo exposto a uma radiação solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia) e temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ . Estas condições são de um dia de sol, ao meio-dia, sem nuvens e temperatura amena. As medidas de tensão e de corrente de um módulo, ligado a uma carga variável podem ser esboçadas num gráfico, que é designado por curva característica do módulo, qual é a base para se avaliar o seu desempenho elétrico e energético de um módulo fotovoltaico.

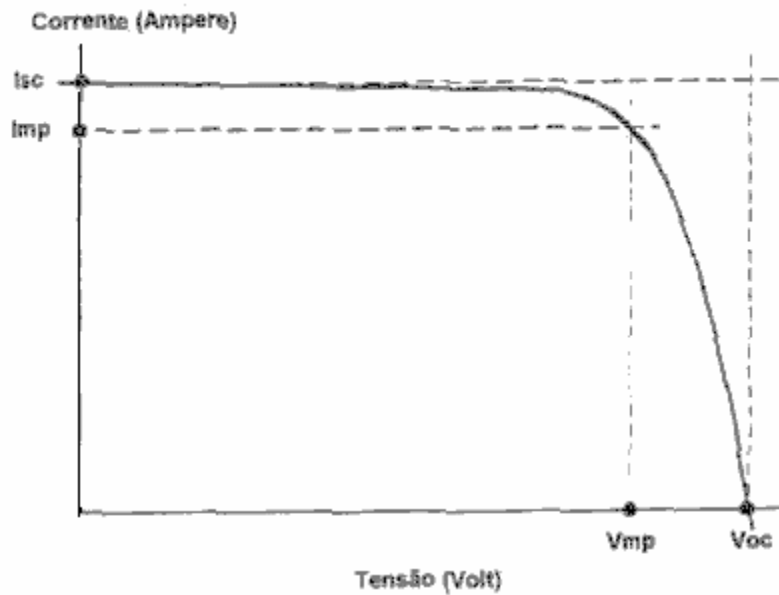


Figura 30 Curva característica de um módulo fotovoltaico [Alvarenga, 2000]

A corrente elétrica produzida varia significativamente com a intensidade da luz incidente. Já a tensão é fortemente influenciada pela temperatura. O aumento da intensidade da luz incidente no módulo aumenta a temperatura das células, diminuindo a tensão do módulo, e reduzindo a sua eficiência. A tensão diminui significativamente com o aumento da temperatura enquanto que a corrente sofre uma elevação muito pequena. O ponto de potência máxima ( $P_m$ ) é o ponto da curva  $I \times V$  para o qual a máxima potência é extraída. Este ponto corresponde ao produto da tensão de potência máxima ( $V_{mp}$ ) e corrente de potência máxima ( $I_{mp}$ ), dado pela equação (2.7):

$$P_m = I_{mp} \times V_{mp} \quad (2.7)$$

Os cinco parâmetros mais utilizados pelos fabricantes para especificar as características elétricas dos seus módulos, sob as condições padrão de radiação solar, temperatura ambiente e massa de ar são: potência máxima ( $P_m$ ), tensão e corrente de potência máxima ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ).

A carga é que determinará em que ponto da curva  $I \times V$  o módulo fotovoltaico irá operar, determinando a corrente e a tensão nominal de operação (que depende da carga). Para cada ponto na curva  $I \times V$ , o produto corrente-tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação.

Na operação normal raramente se trabalha no ponto de máxima potência. Portanto quando se comuta a energia fornecida pelo módulo é recomendável que se trabalhe com a corrente produzida por este e a tensão da bateria a que está ligado [Alvarenga, 2000].

#### **2.4.5. PORTUGAL**

Em Portugal a aposta nos painéis fotovoltaico tem-se feito sentir não só nas habitações, pois começa a ser já parte integrante da paisagem urbanística, como também através do investimento no parque fotovoltaico Hércules que é considerado o maior parque fotovoltaico do mundo. A construção foi iniciada em finais do ano 2002 tendo sido concluído em junho de 2006. O início do seu funcionamento parcial foi em janeiro de 2007 tendo arrancado em plena produção em março de 2007. Localiza-se em Brinches no concelho de Serpa e é constituído por 52 300 painéis. A produção anual estimada é de 21.000 MWh o que levará a poupanças equivalentes em Petróleo de 1720 Toneladas/ano (12556 barris/ano), sendo desta forma evitadas 19000 Toneladas/ano de emissões de CO<sub>2</sub>. O interveniente principal deste projeto é a *GE Energy Financial Services Powerlighth Corporation* Catavento, SA [ESP, 2007].

### **2.5. SISTEMAS HÍBRIDOS**

Antes de nos referirmos aos sistemas híbridos, é necessário entender que existem sistemas isolados que não são mais do que sistemas autónomos, que geralmente não estão ligados à rede e que são extremamente dispendiosos devido à complexidade dos sistemas de armazenamento, face às necessidades energéticas, pois são necessárias compensações instantâneas e diárias, razão pela qual são normalmente utilizados para sistemas de recarga de baterias em regiões remotas, principalmente, para o fornecimento de energia a sistemas de telecomunicações e eletrodomésticos.

Os sistemas híbridos, normalmente não estão ligados à rede, possuindo diversas fontes de geração de energia em conjunto, como por exemplo, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, centros de geradores de biogás, geradores a diesel, etc., portanto, podem existir diversas filosofias, relativamente aos constituintes dos sistemas híbridos (Anexo A). Quanto maior for o número de fontes de geração de energia, maior será a complexidade do sistema, o que justifica o uso de métodos de otimização dessas mesmas fontes.

No entanto, estes mesmos sistemas podem existir ligados à rede, tendo normalmente um elevado porte, sendo toda a produção entregue à rede (não é armazenada), necessitando de valores de tensão e de frequência adequados, de modo a que possam ser diretamente colocados na rede [SSH, 2005].

Nas situações em que as localidades, não estão servidas pela rede de eletricidade pública, quer por fatores geográficos quer económicos, é justificável o emprego de sistemas híbridos. Estas terras requerem eletricidade para vários fins, desde conforto até à indústria. Se este sistema englobar um sistema com um gerador a diesel, há que ter em conta que não poderão haver problemas de abastecimento, pois nestas áreas isoladas esta é uma contrariedade devido à dependência de combustíveis fósseis, o que leva à existência de um sistema de reabastecimento de combustível. Assim, nestas zonas o desenvolvimento de sistemas híbridos, sem recurso ao uso de diesel, justifica-se. Recorre-se então a uma produção de energia através de energias renováveis.

A energia produzida, será conduzida para alimentar cargas, assim como para carregar baterias, que entrarão em funcionamento quando necessário e ainda vendida para a rede, se houver essa possibilidade [FC Hybrid System, 2003].

Por todo o mundo, desde a América do sul passando pela África e sem esquecer a Ásia, podem ser observadas aplicações que fazem uso dos sistemas isolados e híbridos, para que localidades afastadas dos centros urbanos possam ser providas de comodidades como eletricidade e aquecimento (Anexo A).

### **2.5.1. EQUIPAMENTOS**

Os conversores de potência, sejam eles CA/CC (retificadores), CC/CA (inversores) são necessários na conceção e no funcionamento de um sistema híbrido, consoante o tipo de energia gerada e consoante a aplicação dessa mesma energia.

No caso da energia eólica, são utilizados geradores, que têm a finalidade de efetuarem a conversão de energia eólica em energia mecânica. Os geradores podem ser de corrente contínua, síncronos ou até assíncronos.

Bancos de baterias, são equipamentos que devem ser tidos em consideração, pois são uma solução quando a energia produzida excede a necessidade energética da carga. Têm como desvantagem o facto de serem mais eficazes se o armazenamento for por longos períodos

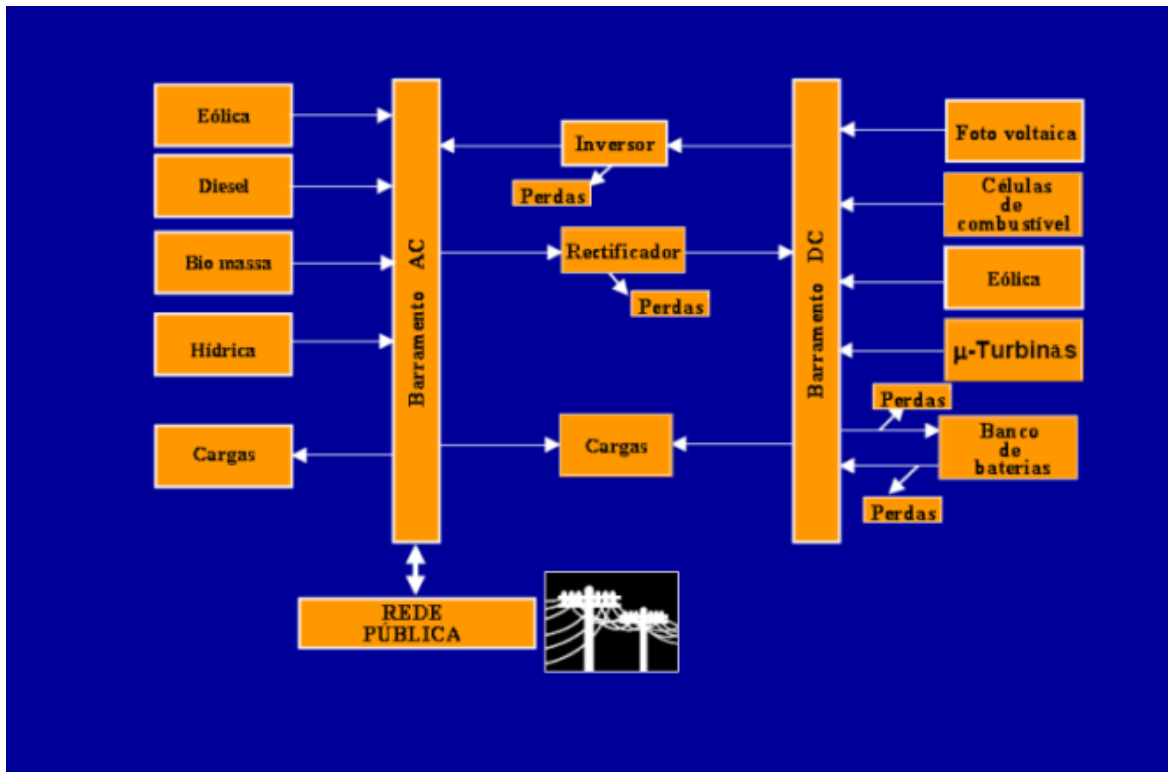
de tempo. O uso deste equipamento leva a que se devam ponderar certos fatores como: tempo de vida, métodos de monitorização do estado da carga, a eficiência quanto à relação entrada/saída e a capacidade máxima de carga.

Ainda temos as cargas que convertem a energia elétrica noutras formas de energia. Se forem cargas de corrente alternada, podem ser resistivas (aquecedores) ou reativas (motores elétricos), enquanto que se forem cargas de corrente contínua, serão alimentadas por fontes de corrente alternada, com recurso a retificadores (no caso da fonte de energia ser por exemplo um aerogerador) [SSH, 2005].

### **2.5.2. FILOSOFIA DE FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS**

Nos sistemas híbridos, como já foi atrás exposto, podem existir diversas configurações. A complexidade do sistema, aumenta com o acréscimo do número de fontes de geração de energia, fator este que leva à aplicação de processos de otimização sobre estas fontes.

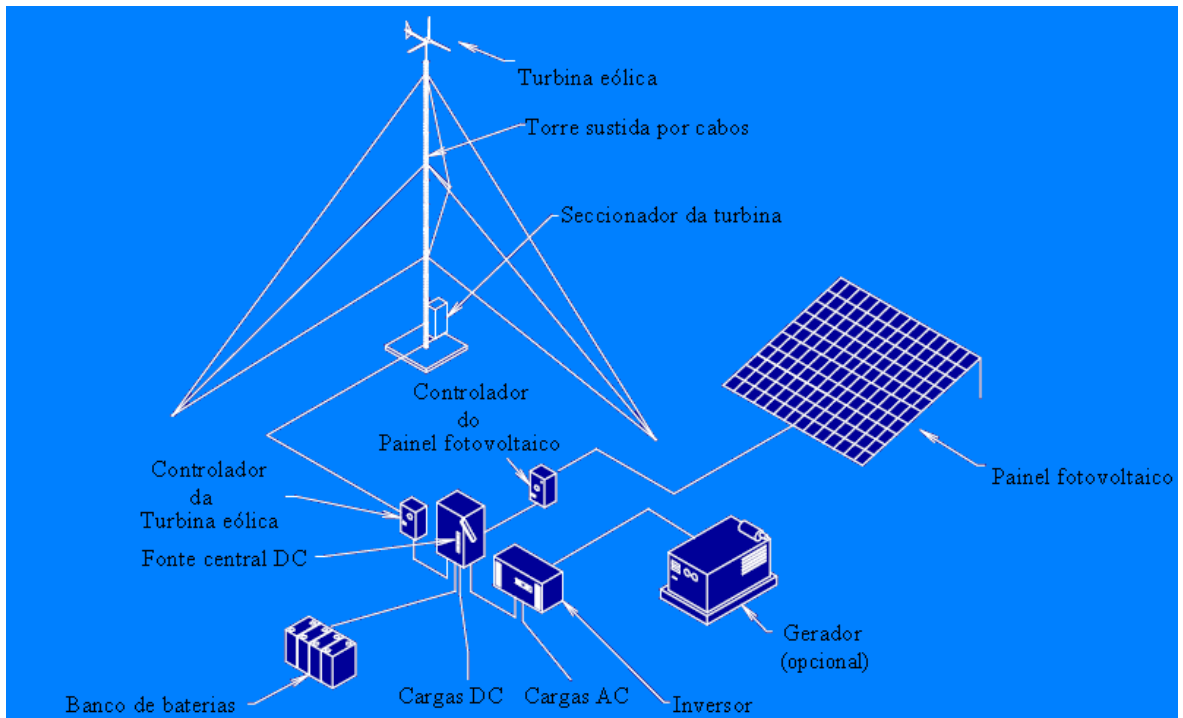
Na figura seguinte (Figura 31), pode-se visualizar um esquema elucidativo da configuração base a que um sistema híbrido obedece, estando neste modelo representadas diversas fontes de energia, assim como os constituintes necessários para o funcionamento destes sistemas, como é o caso de inversores, retificadores ou banco de baterias, assim como as cargas e também a entrega da energia à rede.



**Figura 31 Modelo de um sistema híbrido**

Os sistemas híbridos, podem ser benéficos para a obtenção de redução da dependência das variações de recursos (sejam elas diárias, semanais, mensais, etc.) pois existe mais do que um tipo de recursos disponíveis, o que leva à diminuição do tamanho das baterias assim como a sujeição aos combustíveis fósseis também é menor.

A filosofia adotada, no caso de serem utilizadas como fontes de energia renovável o sol e o vento, possui normalmente a forma apresentada na Figura 32.



**Figura 32 Elementos de um sistema híbrido (solar + eólico) [R Hybrid System, 2001]**

Na Península Ibérica (Figura 33), a energia solar é um recurso que torna a independência energética de combustíveis fósseis uma realidade se explorada convenientemente, a par de outro recurso que Portugal possui (Figura 14), o vento.



**Figura 33 Recurso solar na Península Ibérica [IMP, 2008]**

### **2.5.3. MICROGERAÇÃO**

A microgeração baseia-se na produção de eletricidade através de instalações de energias renováveis de pequena potência com a finalidade de a vender à rede pública, ou seja, a microgeração é no fundo o processo de produção de energia pelo próprio consumidor. Uma instalação deste tipo é habitualmente designada por "unidade de microprodução".

Anteriormente a 2008 a legislação Portuguesa não regulava claramente o regime de microgeração em Portugal. No entanto, com a entrada em vigor nesse mesmo ano no mês de fevereiro do DL 363/2007 de 2 de novembro, veio a mudar o panorama e a microgeração tornou-se numa possibilidade interessante de investimento.

Tipicamente uma instalação de microprodução é composta por um gerador elétrico (Aerogerador, painel fotovoltaico, micro turbina hídrica ou outra fonte de energia renovável), um inversor de corrente para ligação à rede, e também por um contador para a contagem da energia que é injetada na rede elétrica.

Às diferentes fontes de energia correspondem diferentes preços de venda por kWh.

O inversor de corrente para ligação à rede converte a corrente elétrica produzida pelo gerador (seja ele de que tipo for) para os valores adequados à rede elétrica. Para além desta conversão é necessário ter em conta que a rede elétrica está sujeita a variações conforme a carga a que está sujeita. De forma a acompanhar estas oscilações da rede, o inversor monitoriza continuamente a rede elétrica, havendo assim um ajuste dos seus parâmetros de funcionamento aos da rede.

Após a conversão da corrente elétrica pelo inversor de corrente, esta é injetada na rede pública passando antecipadamente por um contador de venda (que é independente do contador de compra).

Ao contrário daquilo que acontece noutros sistemas de energias alternativas, uma instalação de microprodução geralmente não possui uma bateria, pois não é necessário acumular energia numa bateria uma vez que para se poder vender a eletricidade produzida é necessário haver uma ligação à rede elétrica, pelo que a instalação estará sempre provida de eletricidade.

Toda a energia produzida pela instalação é vendida à rede elétrica, ou seja, toda a eletricidade consumida terá na mesma de ser comprada à EDP. No entanto, como o preço de venda era muito superior ao preço de compra, isto era economicamente vantajoso para o microprodutor [DRDL, 2007]. Atualmente a diferença entre o preço de compra e de venda diminuiu não sendo, por isso, tão vantajoso.

Contudo, recentemente em conselho de Ministros foram aprovados pelo Governo, em Setembro de 2014, regimes jurídicos com vista à simplificação da produção de energia para consumo próprio. Atualmente a legislação permite a produção de eletricidade nas residências mas com a contrapartida dessa eletricidade produzida ter de ser injetada na rede elétrica a preços bonificados. Com esta alteração passa a ser possível manter a situação atual mas para além disso também haverá a opção de autoconsumo (não sendo assim obrigatória a injeção na rede elétrica). As instalações legisladas serão de painéis fotovoltaicos em que para potências instaladas superiores a 1 megawatt, será necessária uma licença de produção (abaixo desta potência bastará uma comunicação ao ministério do ambiente) . O autoconsumo é regulado pela legislação nº 153/2014 de 20 de Outubro de 2014." [DR, 2014]

Isto relega-nos para questões relacionadas com a implementação de sistemas que impliquem a utilização de energia com origem em mais do que uma fonte. Com o uso de energias renováveis poderão existir condições por vezes mais favoráveis para uma das energias utilizadas ou até mesmo decorrentes da associação de várias fontes (Anexo B).

## **2.6. CONCLUSÕES**

As necessidades energéticas no nosso planeta, têm vindo a aumentar a olhos vistos, e os países, de uma forma geral, têm sentido a necessidade de adotar medidas estratégicas que melhorem as condições climáticas do planeta. Tentando alcançar estas melhorias sem descuidar o seu próprio desenvolvimento e sustentabilidade, têm encontrado nas energias renováveis um porto seguro. Portugal não foge a esta tendência, e o facto de apresentar condições geográficas e climáticas favoráveis, tornam-no num país com elevado potencial em energias renováveis como por exemplo as energias hídrica, solar e eólica. Estas energias renováveis quando associadas formam os sistemas híbridos, os quais permitem aproveitar as melhores características destas energias, aumentando a rentabilidade dos sistemas de produção de energia.



### 3. LÓGICA DIFUSA

Em 1965, Lotfi Zadeh publicou um artigo na revista *Information and Control*, intitulado de “*Fuzzy Sets*” em que introduziu a teoria dos conjuntos difusos.

No Japão, esta teoria adquiriu um elevado sentido prático ao serem encontradas diversas aplicações em equipamentos industriais, eletrodomésticos, etc. A generalidade das aplicações industriais de sucesso da teoria dos conjuntos difusos foi no desenvolvimento de processos de controlo, denominados de controlo difuso (“*Fuzzy Control*”).

Esta teoria inicialmente não foi bem aceite devido a um certo conservadorismo por parte de defensores das técnicas clássicas de controlo, que pensavam que o trabalho realizado através do controlo difuso era realizável de modo análogo, ou até mais eficaz, através das chamadas técnicas clássicas.

Com o passar do tempo, veio a ser verificado que o controlo difuso permitia atingir benefícios consideráveis do ponto de vista industrial, nomeadamente na duração e no custo de desenvolvimento de novos produtos, fator este que se revela habitualmente decisivo.

Esta técnica permitiu incluir uma forma de capturar a experiência de operadores humanos, através de expressões qualitativas ou linguísticas, o que não é facilmente exequível através das técnicas clássicas de base matemática analítica [ILD, 2000].

### 3.1. VANTAGENS DA IMPLEMENTAÇÃO DO CONHECIMENTO DE ESPECIALISTAS

Na indústria, existem diversos processos de automação em que a parametrização dos controladores necessita de ser realizada por operadores humanos, que através da sua experiência e conhecimento decidem como deve um sistema reagir por exemplo no arranque e no final dos processos.

A conversão destes conhecimentos através de equações diferenciais, torna-se muito difícil, podendo a sua interpretação ser facilmente compreendida através de regras de ação com a forma: “*se acontecer isto, então devo fazer aquilo*” [ILD, 2000].

### 3.2. FUNDAMENTOS DA TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS

Quando são referidos conjuntos difusos, está-se a mencionar algo que vem substituir a lógica binária da teoria dos conjuntos clássica (Verdadeiro ou Falso, da Álgebra de Boole), por uma lógica em que o grau de verdade de uma afirmação pode assumir uma série de valores entre 0 e 1, como por exemplo, afirmar que  $2,98 = 3$ , embora com um grau de verdade de apenas 0,9. Este tipo de afirmação é normal no mundo da engenharia em que se trabalha com estimativas, arredondamentos e coeficientes de segurança.

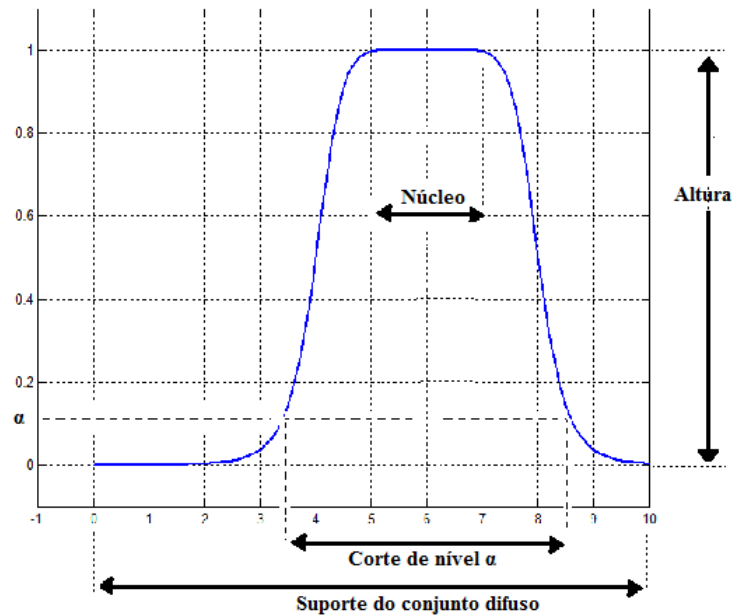
Outro ponto relevante, é o facto de ser possível representar expressões linguísticas qualitativas através da teoria dos conjuntos difusos, como por exemplo, afirmar que um dado desvio de frequência em relação a um valor nominal é um “negativo pequeno”, em vez de se exprimir esta grandeza por um número real como -0,01Hz. Estes dois aspetos estão normalmente, relacionados entre si.

Quando estamos perante a definição de conjunto difuso, tem que lhe ser associado o conceito de função de pertença (“*membership function*”), tal como podemos observar na Figura 34. Na teoria clássica dos conjuntos, para um dado universo e para um conjunto “A” nele definido, estabelece-se uma relação de pertença relativamente a cada elemento “x” nesse universo, tal que, um de dois casos podem acontecer: ou x pertence a A, ou x não pertence a A.

$$\mu_A : A \rightarrow \{0, 1\} \text{ tal que} \tag{3.1}$$
$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \leftarrow x \notin A \\ 1 & \leftarrow x \in A \end{cases}$$

Ou seja, na equação (3.1), os elementos que pertencem a  $A$  têm o valor de pertinência 1 e todos os restantes elementos têm o valor de pertinência 0.

Na teoria dos conjuntos difusos não são assumidos apenas os valores de um conjunto discreto, por exemplo  $\{0,1\}$ , ou seja são aceites valores de pertinência reais no intervalo  $[0,1]$ .



**Figura 34** Conceitos relativos aos conjuntos difusos

Desta forma, mediante dois quaisquer elementos, poderemos eventualmente verificar que um deles se identifica mais com o conceito subjacente à formação do conjunto  $A$  do que o outro [ILD, 2000].

### 3.2.1. PROPRIEDADES E OPERAÇÕES COM CONJUNTOS DIFUSOS

Muitas das propriedades já estabelecidas nos conjuntos clássicos, são válidas nos conjuntos difusos, de tal forma que os ditos conjuntos clássicos não são mais do que casos particulares dos difusos.

Embora pudessem ser assumidos outros valores, se for considerado o intervalo  $[0,1]$ , podem ser estabelecidas definições que ajudam à melhor compreensão, relativamente aos conjuntos difusos.

### 3.2.2. SUPORTE DE UM CONJUNTO DIFUSO

O suporte de um conjunto difuso  $A$  (equação (3.2)) é o conjunto rígido  $S(A)$  que contém todos os elementos de  $A$  com valor de pertença positivo [ILD, 2000]:

$$S(A) = \{x \in A \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (3.2)$$

Se  $A$  for um domínio contínuo incluído no conjunto dos números reais, então o suporte de  $A$  é o menor intervalo fechado que contém o conjunto dos elementos com função de pertença não nula.

### 3.2.3. CONJUNTO DIFUSO CONVEXO

Um conjunto difuso diz-se convexo se for representado por uma função de pertença convexa. Normalmente em controlo difuso são usados apenas este tipo de conjuntos.

### 3.2.4. LARGURA DE UM CONJUNTO DIFUSO

A largura de um conjunto difuso  $A$  com suporte  $S(A)$  é dada pela equação (3.3):

$$Lar(A) = \sup(S(A)) - \inf(S(A)) \quad (3.3)$$

Onde “sup” e “inf” designam o supremo e o ínfimo de  $S(A)$ . Em particular, se o conjunto  $S(A)$  for fechado, então “sup” e “inf” podem ser substituídos pelo máximo e pelo mínimo (max e min).

### 3.2.5. ALTURA DE UM CONJUNTO DIFUSO

Na equação (3.4), está representada a altura  $h$  de um conjunto impreciso, que corresponde ao maior valor de pertença assumido pela sua função de pertença.

$$h(A) = \max\{\mu_A(x), \forall x\} \quad (3.4)$$

### 3.2.6. CORTE DE NÍVEL $\alpha$

Um corte de nível  $\alpha$  é o conjunto  $A_\alpha$  (rígido) dos elementos de um conjunto difuso  $A$  que têm valor de pertença superior a  $\alpha$ . Em particular, se  $A$  estiver definido de forma

contínua sobre uma reta real, então o corte  $A_\alpha$  é a união dos menores intervalos fechados que contêm os elementos com valor de pertença superior a  $\alpha$ .

### 3.2.7. NÚCLEO DE UM CONJUNTO DIFUSO

O núcleo de um conjunto difuso  $A$  (equação (3.5)) é o conjunto rígido  $Nuc(A)$  definido por:

$$Nuc(A) = \{x \in A \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (3.5)$$

### 3.2.8. IGUALDADE DE DOIS CONJUNTOS DIFUSOS

Na equação (3.6), pode ser observado que dois conjuntos difusos  $A$  e  $B$  definidos num mesmo universo  $S$  são iguais se e só se:

$$\forall x \in S : \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (3.6)$$

### 3.2.9. SUBCONJUNTO DE UM CONJUNTO DIFUSO

$A$  é um subconjunto difuso de um conjunto difuso  $B$  nas seguintes condições apresentadas pela equação (3.7):

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \forall x \in S : \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (3.7)$$

### 3.2.10. T – NORMA

Na teoria clássica dos conjuntos, são simples as operações de interseção, união e complementar de conjuntos e estão univocamente definidas, pois os operadores lógicos **e**, **ou** e **não** têm uma definição única que pode ser representada numa “tabela de verdade”. Porém, ingressando na teoria dos conjuntos difusos, deparamo-nos com uma multiplicidade de definições possíveis e todas compatíveis com a definição clássica, no caso particular das funções de pertença serem booleanas. Torna-se portanto necessário introduzir os conceitos de **T – norma** e de **T – conorma** (S – norma).

Uma norma triangular (T – norma  $\otimes$ ) enquadra uma classe de relações binárias que representam a operação de interseção; isto implica que estejam presentes as seguintes propriedades (equação (3.8)):

$$\otimes : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1] \text{ tal que} \quad (3.8)$$

$$T-1: a \otimes b = b \otimes a \quad \text{Comutatividade}$$

$$T-2: (a \otimes b) \otimes c = a \otimes (b \otimes c) \quad \text{Associatividade}$$

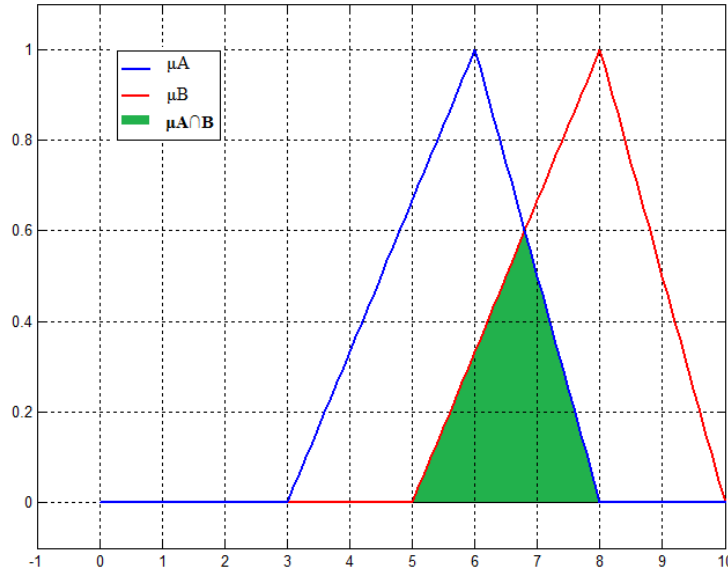
$$T-3: a \leq b \wedge b \leq c \Rightarrow a \otimes b \leq b \otimes c \quad \text{Monotonicidade}$$

$$T-4: a \otimes 1 = a \quad \text{Elemento}$$

$$\text{Neutro: } 1$$

Da aplicação de  $T-3$  e  $T-4$  resulta que para todo o  $a \in [0, 1]$  se tem  $0 \otimes a = 0$ .

Os operadores  $\min\{a, b\}$ , produto  $(ab)$ ,  $\max\{0, a+b-1\}$  são exemplos de T – normas. A operação de interseção (Figura 35) de conjuntos difusos pode ser representada por qualquer uma destas normas e note-se que, quando  $a$  e  $b$  pertencem a  $\{0, 1\}$  todos estes operadores produzem como resultado a definição clássica de interseção de conjuntos da Álgebra de Boole.



**Figura 35** Representação da operação de intersecção de dois conjuntos difusos

A definição mais simples e clássica da interseção é a de Zadeh, baseada no operador min. Como podemos ver no seguinte exemplo, se um homem pertence ao conjunto de homens altos com valor de pertença **0,7** e ao conjunto dos homens louros com valor de pertença **0,4**, **então** este homem pertence ao conjunto dos homens altos e louros com valor de

pertença **0,4**. No fundo, a força de ligação de um elemento a duas propriedades em simultâneo corresponde à mais “fraca” das “ligações” estando assim presente o princípio da fiabilidade de sistemas, em que a resistência de uma cadeia é a do seu elo mais fraco (é por ali que irá quebrar, quando submetida a esforço de tração).

### 3.2.11. S – NORMA

Uma conorma triangular ou S – norma  $\oplus$ , representa uma classe de relações binárias aptas a caracterizarem a operação de união (Figura 36); para tal, têm que ser verificadas as seguintes propriedades (equação (3.9)):

$$\oplus: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1], \text{ tal que} \quad (3.9)$$

$$S-1: a \oplus b = b \oplus a \quad \text{Comutatividade}$$

$$S-2: (a \oplus b) \oplus c = a \oplus (b \oplus c) \quad \text{Associatividade}$$

$$S-3: a \leq b \wedge b \leq c \Rightarrow a \oplus b \leq b \oplus c \quad \text{Monotonicidade}$$

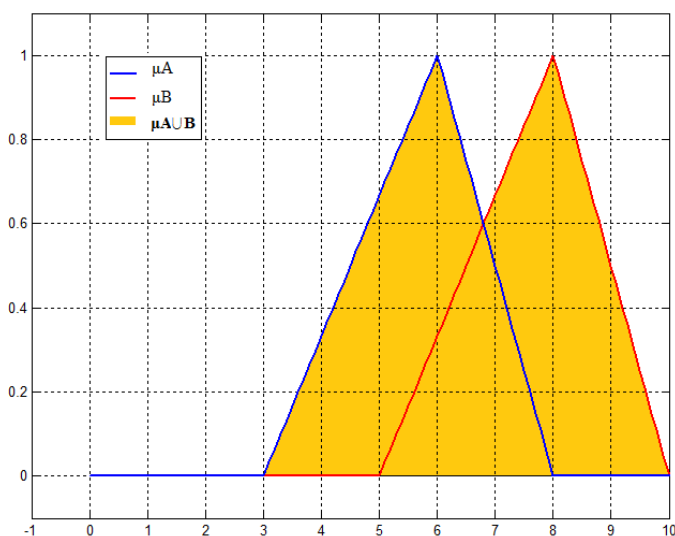
$$S-4: a \oplus 0 = a \quad \text{Elemento Neutro: } 0$$

Pode ser verificado que para todo o  $a \in [0,1]$  se tem  $1 \times a = 1$ , conjugando as propriedades S-3 e S-4.

Exemplos de T – normas e S – normas conjugadas, são os pares de operadores  $\{\min, \max\}$ , ou  $\{ab, a + b - ab\}$ . Na tabela seguinte (Tabela 2) são citados alguns exemplos.

Tabela 2 Tabela com exemplos de T-normas e S-normas

Designação	T – norma	Designação	S – norma
Mínimo	$\min\{a, b\}$	máximo	$\max\{a, b\}$
Produto de Hamacher	$\frac{ab}{a+b-ab}$	Soma de Hamacher	$\frac{a+b-2ab}{1-ab}$
Produto algébrico	$ab$	Soma algébrica	$a+b-ab$
Produto de Einstein	$\frac{ab}{2-[a+b-ab]}$	Soma de Einstein	$\frac{a+b}{1+ab}$
Diferença limitada	$\max\{0, a+b-1\}$	Soma limitada	$\min\{1, a+b\}$
Produto drástico	$\begin{cases} \min\{a, b\}, \\ se, \max\{a, b\} = 1 \\ 0, noutro\_caso \end{cases}$	Soma drástica	$\begin{cases} \max\{a, b\}, \\ se, \min\{a, b\} = 0 \\ 1, noutro\_caso \end{cases}$



3.2.12.

Figura 36 Representação da operação de união entre dois conjuntos difusos

### 3.2.13. COMPLEMENTO

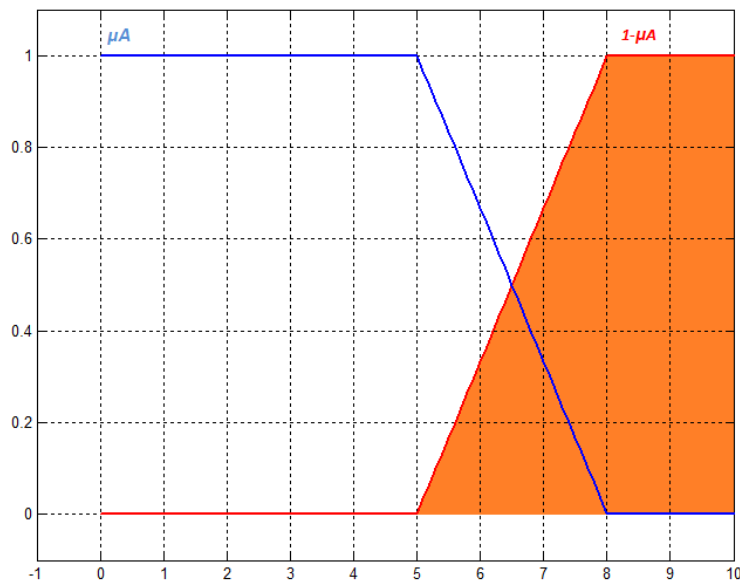
O complemento  $C(A)$  de um conjunto  $A$  determina-se pela aplicação de um operador  $C$ , traduzido linguisticamente pela designação de “operador não”, que deve obedecer às seguintes propriedades (equação (3.10)):

$$C-1: C(0)=1$$

$$C-2: a < b \Rightarrow C(a) < C(b) \tag{3.10}$$

$$C-3: C(C(a))=a$$

Um aspeto importante da teoria dos conjuntos difusos, que difere do habitual da teoria de conjuntos clássica (ou de Boole): é que a união de um conjunto com o seu complemento não dá o conjunto universal; e a interseção de um conjunto com o seu complementar não é um conjunto vazio, aliás como podemos observar na Figura 37.



**Figura 37 Representação de um conjunto difuso e do seu complemento**

Isto só acontece se as funções de pertinência forem booleanas. Temos também que pares conjugados de T – normas e S – normas obedecem a leis de Morgan (equação (3.11)) generalizadas pela aplicação de operadores de negação adequados como  $1-\mu$ . Por exemplo:

$$\begin{aligned} a \oplus b &= C[C(a) \otimes C(b)] \\ a \otimes b &= C[C(a) \oplus C(b)] \end{aligned} \tag{3.11}$$

### 3.2.14. RELAÇÕES DIFUSAS

Uma relação binária clássica indica a existência de um certo tipo de interação entre elementos de dois conjuntos. As relações binárias difusas generalizam o conceito, por forma a representarem diversos graus de associação entre elementos. Estes graus podem

ser representados por níveis de pertença, tal como num conjunto difuso se estabelecem diversos graus de pertença para distintos elementos.

Uma relação clássica (rígida) entre dois conjuntos  $X, Y$  pode ser vista como definindo um subconjunto rígido do produto cartesiano  $X \times Y$  e é muitas vezes representada por  $R(X, Y)$ . Assim pode escrever-se que  $R(X, Y) \subseteq X \times Y$ .

Uma relação binária difusa (equação (3.12)) associa a cada par do produto cartesiano um valor de pertença:

$$R(X, Y) = \{(x_1, x_2), \mu_R(x_1, x_2) \mid (x_1, x_2) \in X \times Y\} \quad (3.12)$$

Uma relação difusa binária pode ser representada por uma matriz  $n \times m$  (para  $\#X = n$ ,  $\#Y = m$ ), caracterizada pela equação (3.13):

$$R(X, Y) = \begin{bmatrix} \mu_R(x_1, y_1) & \mu_R(x_1, y_2) & \dots & \mu_R(x_1, y_m) \\ \mu_R(x_2, y_1) & \mu_R(x_2, y_2) & \dots & \mu_R(x_2, y_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_R(x_n, y_1) & \mu_R(x_n, y_2) & \dots & \mu_R(x_n, y_m) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Uma relação difusa é dita normal se o valor máximo ou de pico da função de pertença é igual a 1.

### 3.2.15. OPERAÇÕES COM RELAÇÕES DIFUSAS

Como uma relação difusa de  $X$  em  $Y$  é um conjunto difuso em  $X \times Y$ , as operações com conjuntos difusos podem ser estendidas às operações difusas binárias. Existem algumas operações especiais relevantes para as relações difusas, nomeadamente a projeção e a extensão cilíndrica.

Na **projeção**, dada uma relação difusa  $R(X, Y)$ , a projeção de  $R$  em  $Y$ ,  $proj[R, Y]$ , é um conjunto difuso em  $Y$  cuja função de pertença (equação (3.14)) é dada por:

$$\mu_{proj[R, Y]} = \sup \mu_R(x, y) \quad (3.14)$$

Se o universo de discursos for discreto, pode-se substituir “sup” pela operação  $\max$ . Do mesmo modo, o conceito de projeção pode generalizar-se para qualquer norma  $S$  – norma.

Na extensão cilíndrica, dado um conjunto difuso  $R$  em  $X$ ,  $R(X)$ , a extensão cilíndrica de  $R$  para  $Y$ ,  $ec[R, Y]$ , é uma relação  $R(X, Y)$  definida em  $X \times Y$ , com uma função de pertença (equação (3.15)) dada por:

$$\mu_{ec[R, Y]} = \mu_R(x), \forall x \in X, y \in Y \quad (3.15)$$

A extensão cilíndrica produz uma relação difusa mais “larga” (no sentido da amplitude dos valores da função de pertença) compatível com a sua projeção (equação (3.16)) no domínio original.

Assim,

$$proj[ec[R, Y], Y] = R(x) \quad (3.16)$$

mas em geral, como se constatar na equação (3.17), já não se verifica:

$$ec[proj[R, Y], Y] \neq R(X, Y) \quad (3.17)$$

A extensão cilíndrica é especialmente útil para permitir a interseção entre um conjunto difuso  $A(X)$  e uma relação difusa  $R(X, Y)$ ; esta interseção não pode efetuar-se imediatamente, porque num caso temos elementos de  $X$ , noutro os elementos são pares ordenados de  $X \times Y$ . Mas, se primeiro se calcular  $ec[A, Y]$ , também temos  $A$  estendido a  $X \times Y$  e então a realização da interseção já é possível.

### 3.2.16. COMPOSIÇÃO

Seja  $A$ , um conjunto difuso definido em  $X$  e  $R$  com uma relação difusa definida em  $X \times Y$ . A composição de  $A$  e  $R$  (equação (3.18)) é um conjunto difuso  $B$ , definido em  $Y$  e dado por:

$$B = A \circ R = proj[(ec[A, Y] \cap R), Y] \quad (3.18)$$

onde  $\circ$  representa a “composição de”.

Se se utilizar o par max-min, então a função de pertença de  $B$  (equação (3.19)) é dada por:

$$\mu_B(y) = \max \{ \min(\mu_A(x), \mu_R(x, Y)) \} \quad (3.19)$$

Esta composição recebe o nome de composição max-min.

Analogamente à composição de relações binárias rígidas, a composição max-min exhibe as seguintes propriedades (equação (3.20)):

$$\begin{aligned}
 R \circ S &\neq S \circ R \\
 [R \circ S]^{-1} &= S^{-1} \circ R^{-1} \\
 (R \circ S) \circ T &= R \circ (S \circ T)
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

As equações com relações difusas desempenham um papel importante em áreas como o controlo difuso, reconhecimento de padrões ou decisão.

Vejamos a seguinte equação, (3.21):

$$A \circ R = B \tag{3.21}$$

com uma função de pertença dada pela composição max-min. Se interpretarmos  $R$  como um conjunto difuso,  $A$  como sinais de resposta difusos, podemos tomar a equação relacional como a descrição do comportamento de um sistema difuso através da associação “entrada difusa – saída difusa”. Assim, dada uma entrada difusa  $A$ , pode-se determinar facilmente a sua resposta difusa  $B$ .

Em problemas inversos, como sejam, dados  $R$  e  $B$  determinar a entrada  $A$ , ou dados  $A$  e  $B$ , determinar a relação de transferência  $R$ , não são triviais pelo que não há garantias de haver uma única solução para eles, ou sequer em alguns casos, haver uma qualquer solução.

### 3.2.17. VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Zadeh escreveu: “Por variável linguística entendemos uma variável cujos valores sejam palavras ou frases numa linguagem natural ou artificial”. Por exemplo, IDADE é uma variável linguística se os seus valores forem linguísticos em vez de numéricos, como jovem, não jovem, muito jovem, bastante jovem, velho, não muito velho nem muito novo, etc., em vez de 20, 21, 22, 23, ...”

Associado ao conceito de variável linguística é habitual considerar-se o seguinte conceito de trabalho (3.22):

$$\{X, L(X), \chi, M\chi\} \tag{3.22}$$

em que:

$X$  – é o nome simbólico da variável (idade, altura, velocidade, fluxo, temperatura, variação do erro,...)

$L(X)$  – é o conjunto dos valores linguísticos que uma variável linguística pode assumir, por exemplo, para a variável “erro”, pode ser o conjunto:

$$\left\{ \begin{array}{l} NG(\textit{negativo\_grande}); NM(\textit{negativo\_médio}); NP(\textit{negativo\_pequeno}); ZO(\textit{zero}); \\ PP(\textit{positivo\_pequeno}); PM(\textit{positivo\_médio}); PG(\textit{positivo\_grande}) \end{array} \right\}$$

$\chi$  – é o domínio físico ou real onde a variável linguística assume valores numéricos rígidos, por exemplo, para a variável “erro” pode ser um dos valores: -5; 0; +2, etc.

$M_{\chi}$  – é uma função semântica que fornece um significado (interpretação) a uma variável linguística em termos dos valores quantitativos de  $\chi$  – define um conjunto difuso.

### 3.2.18. PROPOSIÇÕES DIFUSAS

O raciocínio aproximado (*approximate reasoning*) permite a representação e a inferência a partir de conhecimento expresso na forma de linguagem natural, como seja, com a expressão “o erro tem um valor negativo pequeno”.

O significado desta expressão é explicitado por um conjunto impreciso NP com a respetiva função de pertinência  $\mu_{NP}$ , definida num domínio físico  $\mathcal{E} = [\varepsilon_{\min} - \varepsilon_{\max}]$ . A função de pertinência exprime, para cada valor rígido numérico da variável física “erro”, o grau com que esse valor pode ser associado ao conceito de negativo pequeno.

Com recurso a conectores linguísticos como “e”, “ou”, “não” e outros, podem formar-se expressões mais complexas. Estes conectores correspondem a operações de conjunção, disjunção e negação de conjuntos difusos.

**Conjunção:** dadas duas expressões linguísticas,  $p: X \text{ é } A$  e  $q: X \text{ é } B$ , onde A e B são dois conjuntos difusos definidos no mesmo universo de discurso (domínio), a conjunção é, definida por “p e q”, ou seja  $X \text{ é } A$  e  $X \text{ é } B$ , o que quer dizer que X é dado por  $A \cap B$ , com função de pertinência  $\mu_{A \cap B}$  definida por uma T- norma adequada.

**Disjunção:** de forma análoga pode-se representar, com recurso a uma S – norma adequada, a disjunção “ $p$  ou  $q$ ”.

### 3.2.19. PROPOSIÇÕES DIFUSAS CONDICIONAIS

Uma proposição difusa condicional (3.23), ou **se – então** difuso é da forma, **se** <proposição difusa> **então** <proposição difusa>. Onde <proposição difusa> pode ser simples ou composta. Por exemplo, tomemos as variáveis  $\varepsilon$  (erro) e  $\Delta\varepsilon$  (variação do erro) e ainda  $\Delta u$  (variação na variável de controlo). Então, uma frase construída será:

$$\text{SE } \varepsilon \text{ é NG e } \Delta\varepsilon \text{ é PG, então } \Delta u \text{ é NP} \quad (3.23)$$

(**se** o erro é negativo grande e a variação do erro é positiva grande, **então** a variação no controlo deverá ser negativa pequena); isto é um exemplo típico de proposição condicional difusa.

Na afirmação “**se**  $X$  é  $A$ , **então**  $Y$  é  $B$ ,” definida em  $\chi \times \psi$ , produto dos domínios das variáveis linguísticas  $X$  e  $Y$ , temos que:

- o significado de  $X$  é  $A$ , designado como antecedente, é representado por um conjunto difuso com uma função de pertença  $\mu_A$ .
- o significado de  $Y$  é  $B$ , designado como conseqüente, é representado por um conjunto difuso com função de pertença  $\mu_B$ .
- o significado da proposição condicional é então uma relação difusa  $\mu_R$ , em que a função de pertença é dada por (3.24):

$$\forall x \in \chi \forall y \in \psi : \mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (3.24)$$

em que “ $*$ ” é um operador de implicação de um dos tipos que veremos a seguir.

Quando o antecedente ou o conseqüente são compostos (exprimem-se por composições difusas) as respetivas funções de pertença calculam-se usando o modo explicado anteriormente; por fim aplica-se o operador “ $*$ ” para determinar a função de pertença da relação difusa associada à implicação.

### 3.2.20. IMPLICAÇÕES

Há um variado número de operadores que podem ser usados para representar o significado de uma implicação do tipo **se**  $X$  é  $A$ , **então**  $Y$  é  $B$ . Em geral, a sua expressão deriva da aplicação de princípios de lógica multivalor (por oposição à lógica Aristotélica binária, com dois valores: verdadeiro e falso).

Uma implicação traduz-se numa relação difusa  $R(X, Y)$ , com uma função de pertença associada.

Se  $V(p)$  denotar o valor de verdade de uma expressão lógica, podemos encontrar diferentes metodologias para ilustrar essas implicações. Assim, podemos salientar estes três casos:

**Implicação de Lukasiewicz** ((3.25) e (3.26)):

$$p \Rightarrow q \equiv \neg p \vee q \quad (3.25)$$

$$\mu_{Ra}(x, y) = \min(1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)) \quad (3.26)$$

(usando como operador de disjunção a soma limitada)

**Implicação de Zadeh** ((3.27) e (3.28)):

$$p \Rightarrow q \equiv (p \wedge q) \vee \neg p \quad (3.27)$$

$$\mu_{Rm}(x, y) = \max\{\min(\mu_A(x), \mu_B(y)), 1 - \mu_A(x)\} \quad (3.28)$$

(usando o par max-min)

**Implicação de Mamdani** ((3.29) e (3.30)):

$$p \Rightarrow q \equiv p \wedge q \quad (3.29)$$

$$\mu_{Rm}(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (3.30)$$

Esta implicação é muito usada em problemas de controlo difuso. A sua análise assume por isso uma importância fundamental.

### 3.2.21. INFERÊNCIA

Há duas regras fundamentais em processos de raciocínio aproximado para proceder a inferências: a regra composicional da inferência e o *modus ponens* generalizado. A primeira, usa uma relação difusa para representar explicitamente a associação entre duas proposições difusas e a segunda, usa um procedimento **se – então** que representa implicitamente uma relação difusa.

O *modus ponens* generalizado obedece ao seguinte esquema simbólico:

$$\left| \begin{array}{l} A_1 \text{ é } Q_1 \\ \\ \text{se } A_1 \text{ é } P_1, \text{ então } A_2 \text{ é } P_2 \\ \\ \therefore A_2 \text{ é } Q_2 \end{array} \right.$$

onde  $A_1$  e  $A_2$  são designações simbólicas de objetos e  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $Q_1$  e  $Q_2$  são propriedades.

Concretizando com um exemplo:

A corrente elétrica é muito intensa  
**Se** a corrente elétrica é muito intensa  
**então** os efeitos eletromagnéticos são fortes.  
 $\therefore$  Os efeitos eletromagnéticos são muito fortes.

Intenso, muito intenso, forte, muito forte, correspondem a conjuntos difusos. É exequível atribuir significado à conclusão, através de uma adequada função de pertença.

A regra composicional da inferência pode ser considerada um caso especial do *modus ponens* generalizado.

Simbolicamente será:

$$\left| \begin{array}{l} A_1 \text{ é } Q_1 \\ \\ A_1 R A_2 \\ \\ \therefore A_2 \text{ é } Q_2 \end{array} \right.$$

onde  $A_1 R A_2$  significa que  $A_1$  está relacionado com  $A_2$  por uma relação difusa  $R$  com  $\mu_R$ .

Por exemplo:

m é um número pequeno  
 m é um pouco maior que n  
 ∴ n é um número bastante pequeno

onde “um pouco maior que” é uma relação difusa.

Ora, se  $R$  é uma relação difusa de  $A_1$  e  $A_2$  e se  $Q_1$  é um subconjunto difuso, então o subconjunto difuso  $Q_2$  induzido por  $Q_1$ , é dado pela composição de  $R$  e  $Q_1$ :

$$Q_2 = A_1 \circ R \quad (3.31)$$

Ou seja, como já vimos anteriormente, procede-se à extensão cilíndrica de  $Q_1$ , intersesta-se com  $R$  e projeta-se o resultado em  $A_2$  [ILD, 2000].

### 3.3. FUNÇÕES DE PERTENÇA

Uma análise mais pormenorizada das funções de pertença, permite-nos entender, de quais dos parâmetros estas dependem matematicamente. Com recurso ao MATLAB, é possível visualizar graficamente o desenvolvimento de cada uma das funções de pertença.

#### 3.3.1. FUNÇÃO DE PERTENÇA SINUSOIDAL

Na Figura 38, podemos visualizar a função de pertença sinusoidal (*sigmf*), a qual é dada pela função  $f(x; a, c)$ , mapeada no vetor  $x$  através dos parâmetros  $a$  e  $c$ :

$$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (3.32)$$

sendo a sua sintaxe dada por:

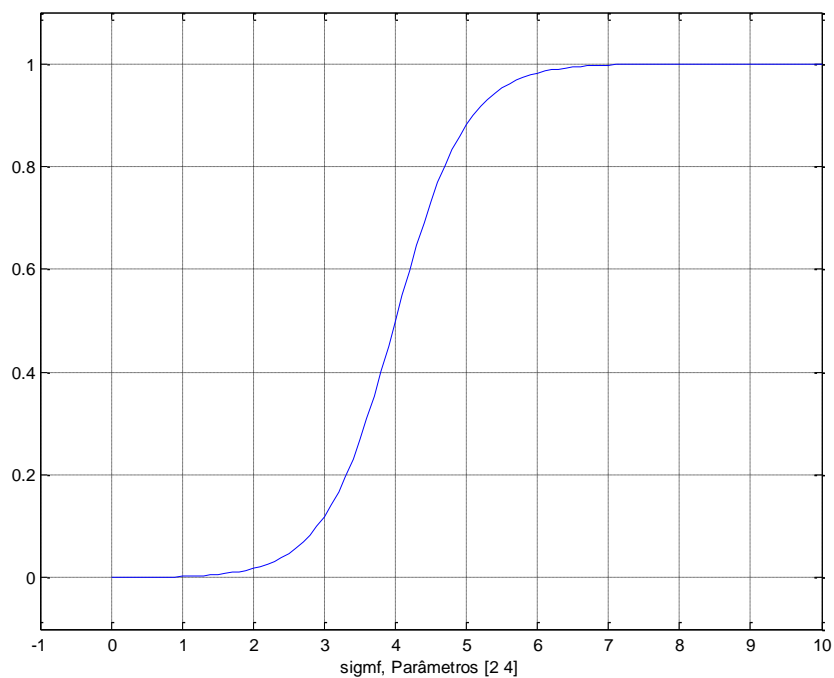
$$y = \text{sigmf}(x, [a \ c])$$

Dependendo do sinal do parâmetro  $a$ , a função de pertinência sinusoidal é aberta à direita ou à esquerda, o que é apropriado para se representarem conceitos como "Muito Grande" ou "Muito Negativo".

Uma visualização mais convencional desta função de pertinência, pode ser feita através da construção de funções de pertinência a partir do produto ou diferença entre duas funções sinusoidais, como se pode ver pela análise das funções  $dsigmf$  e  $psigmf$ , descritas no pontos seguintes, nomeadamente nas subsecções 3.3.2. e 3.3.3..

Então, com o recurso ao MATLAB:

```
>> x=0:0.1:10;  
>> y=sigmf(x,[2 4]);  
>> plot(x,y);  
>> xlabel('sigmf, Parâmetros [2 4]')  
>> grid on  
>> axis ([-1 10 -0.1 1.1])
```



**Figura 38 Função de pertinência Sinusoidal**

### 3.3.2. FUNÇÃO DE PERTENÇA DIFERENÇA SINUSOIDAL

A função  $dsigmf$ , é uma função de pertinência composta pela diferença entre duas funções de pertinência sinusoidais. Cada uma das funções de pertinência sinusoidais utilizadas dependem de dois parâmetros,  $a$  e  $c$  dados por:

(3.33)

$$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

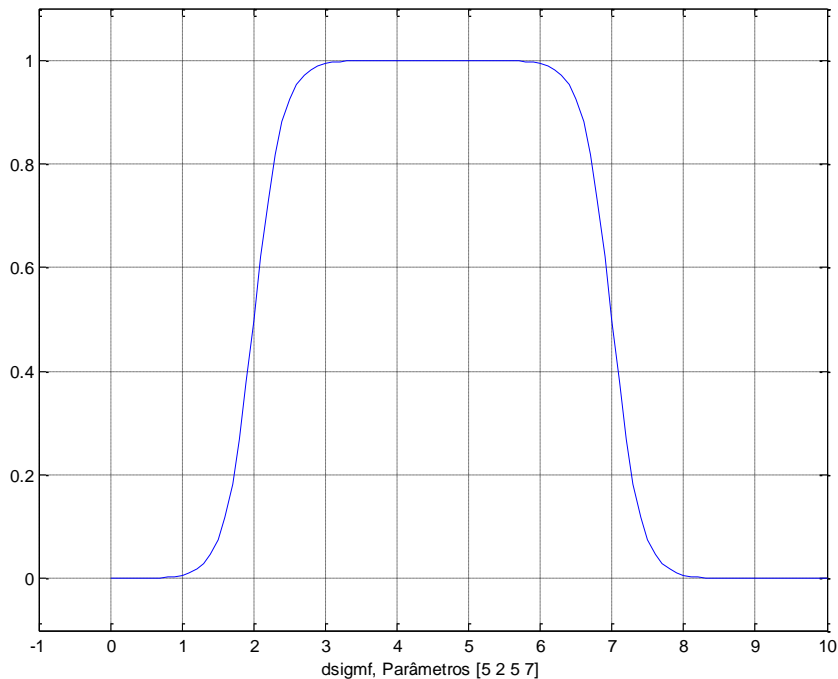
Assim, a função *dsigmf* (Figura 39) depende de quatro parâmetros  $a_1, c_1, a_2, c_2$ , e, tal como referido, é definida pela diferença entre as duas funções de pertença sinusoidais  $f_1(x; a_1, c_1) - f_2(x; a_2, c_2)$ .

A sintaxe desta função é definida por:

$$y = \text{dsigmf}(x, [a_1 \ c_1 \ a_2 \ c_2])$$

Podemos visualizar, recorrendo ao MATLAB, a forma adquirida pela função *dsigmf*, para os parâmetros  $a_1=5, c_1=5, a_2=5$  e  $c_2=7$

```
>> x=0:0.1:10;  
>> y=dsigmf(x, [5 2 5 7]);  
>> plot(x,y)  
>> hold on  
>> grid on  
>> xlabel('dsigmf, Parâmetros [5 2 5 7]')  
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])
```



**Figura 39** Função de pertença da diferença sinusoidal

### 3.3.3. FUNÇÃO DE PERTENÇA DO PRODUTO ENTRE DUAS FUNÇÕES DE PERTENÇA SINUSOIDAIS

A função *psigmf* (Figura 40) é uma função de pertença composta pelo produto entre duas funções de pertença sinusoidais, em que, cada uma dessas funções dependem de dois parâmetros *a* e *c*, como já referido na secção 3.3.1.

A sua sintaxe tem a forma:

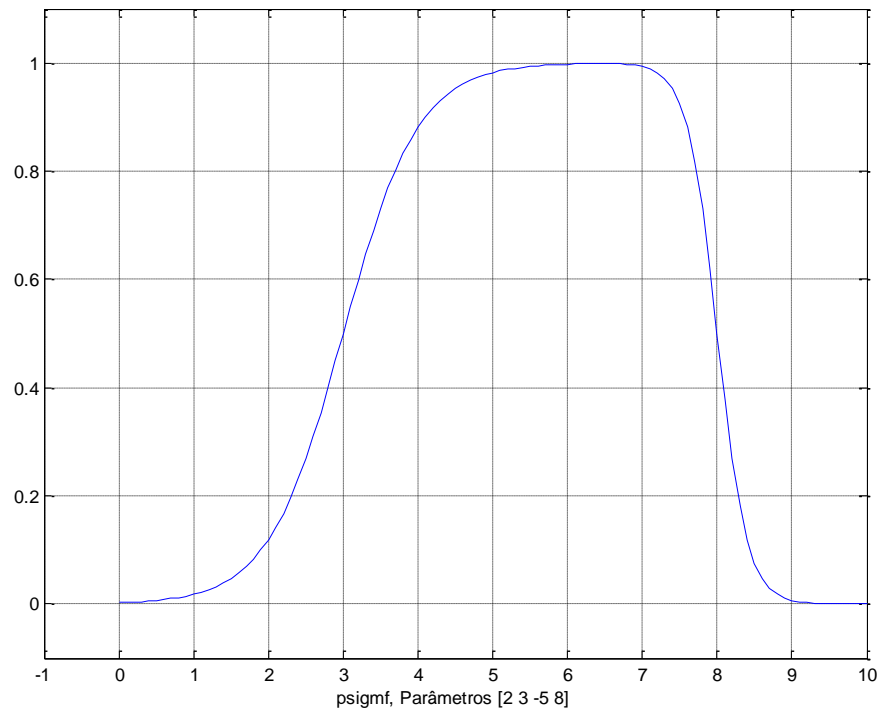
$y = \text{psigmf}(x, [a_1 \ c_1 \ a_2 \ c_2])$ , estando os parâmetros no vetor *x* ordenados por esta ordem ( $a_1 \ c_1 \ a_2 \ c_2$ ).

Então, *psigmf* é simplesmente o produto de duas funções, que podemos ver na seguinte equação:

$$f_{psigm} = f_1(x; a_1, c_1) \times f_2(x; a_2, c_2) \quad (3.34)$$

Desta forma, com o seguinte código obtemos:

```
>> x = 0:0.1:10;  
>> y = psigmf(x, [2 3 -5 8]);  
>> plot(x, y);  
>> xlabel('psigmf, Parâmetros [2 3 -5 8]')  
>> grid on  
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])
```



**Figura 40 Função de pertinência do produto sinusoidal**

### 3.3.4. FUNÇÃO DE PERTENÇA GAUSSIANA

A função *gaussmf* (Figura 41) é denominada de função de pertinência gaussiana. Esta função depende de dois parâmetros sig e c sendo descrita, tal como na função anterior, por:

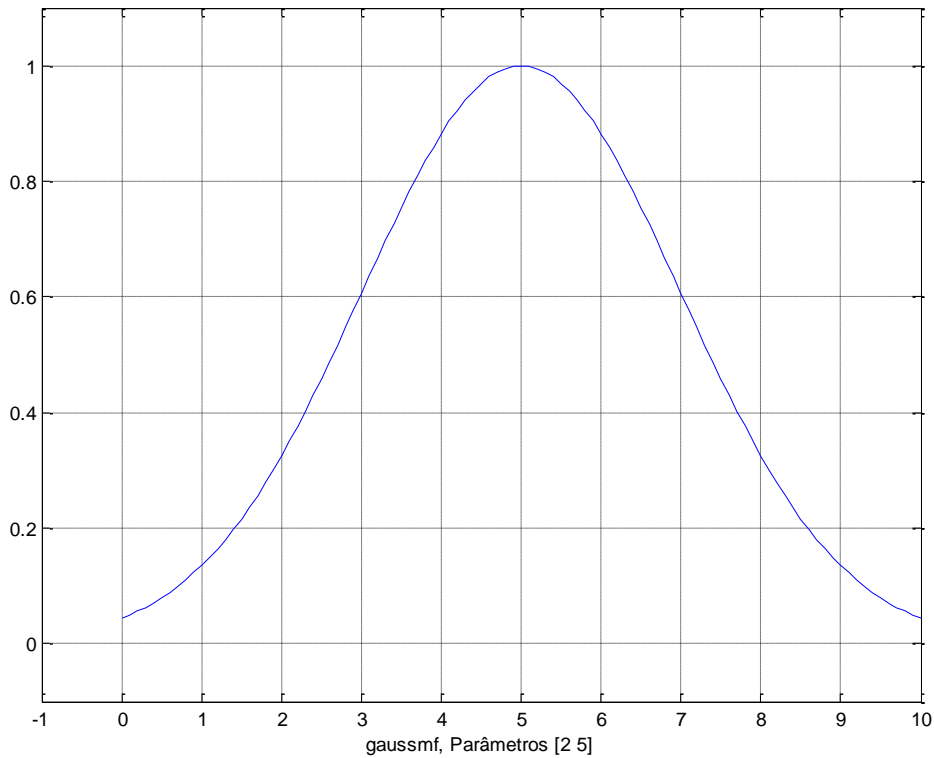
$$f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.35)$$

Através do MATLAB, para a função de pertinência gaussiana, a sua sintaxe é definida como:

$$y = \text{gaussmf}(x, [\text{sig } c])$$

Podemos então visualizar que respetivamente para os parâmetros sig = 2 e c = 5, listados tal como nos exemplos anteriores:

```
>> x = 0:0.1:10;
>> y = gaussmf(x, [2 5]);
>> plot(x, y);
>> xlabel('gaussmf, Parâmetros [2 5]');
>> grid on
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])
```



**Figura 41 Função de pertinência Gaussiana**

### 3.3.5. FUNÇÃO DE PERTENÇA DE COMBINAÇÃO GAUSSIANA

Designa-se por função de pertinência de combinação Gaussiana, a função de pertinência *gauss2mf* (Figura 42) que combina duas funções Gaussianas descritas anteriormente. A primeira função é descrita pelos parâmetros **sig<sub>1</sub>** e **c<sub>1</sub>**, que determinam a forma da parte esquerda da curva. A segunda é especificada pelos parâmetros **sig<sub>2</sub>** e **c<sub>2</sub>**, que determinam a parte direita da curva. Sempre que se verifique que  $c_1 < c_2$  a função *gauss2mf* alcança o valor máximo de 1, caso contrário o máximo é inferior a 1, como se pode observar na Figura 42.

Através do seguinte exemplo, podemos observar a forma adquirida pela função *gauss2mf*, para os parâmetros **sig<sub>1</sub>**, **c<sub>1</sub>**, **sig<sub>2</sub>** e **c<sub>2</sub>**, sendo a sintaxe usada para esta função:

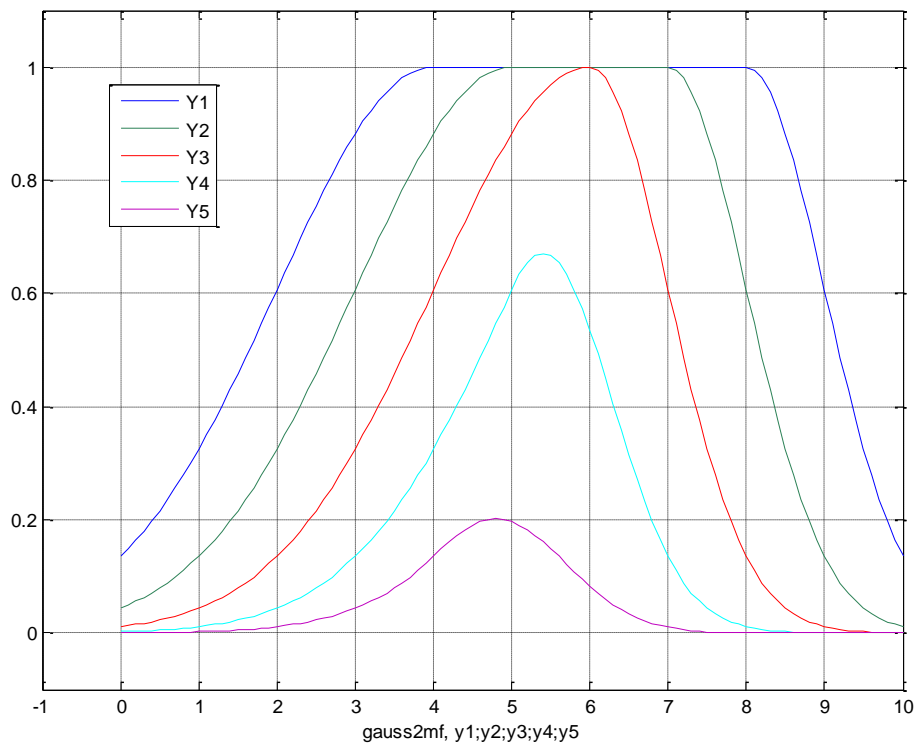
$$y = \text{gauss2mf}(x, [\text{sig}_1 \ c_1 \ \text{sig}_2 \ c_2])$$

Então, desta forma, podemos elaborar o seguinte código, que nos permite ver várias funções gaussianas em simultâneo.

```

>> x = 0:0.1:10;
>> y1 = gauss2mf(x, [2 4 1 8]);
>> y2 = gauss2mf(x, [2 5 1 7]);
>> y3 = gauss2mf(x, [2 6 1 6]);
>> y4 = gauss2mf(x, [2 7 1 5]);
>> y5 = gauss2mf(x, [2 8 1 4]);
>> plot(x, [y1 y2 y3 y4 y5]);
>> hold on
>> grid on
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])

```



**Figura 42 Função de pertença de combinação Gaussiana**

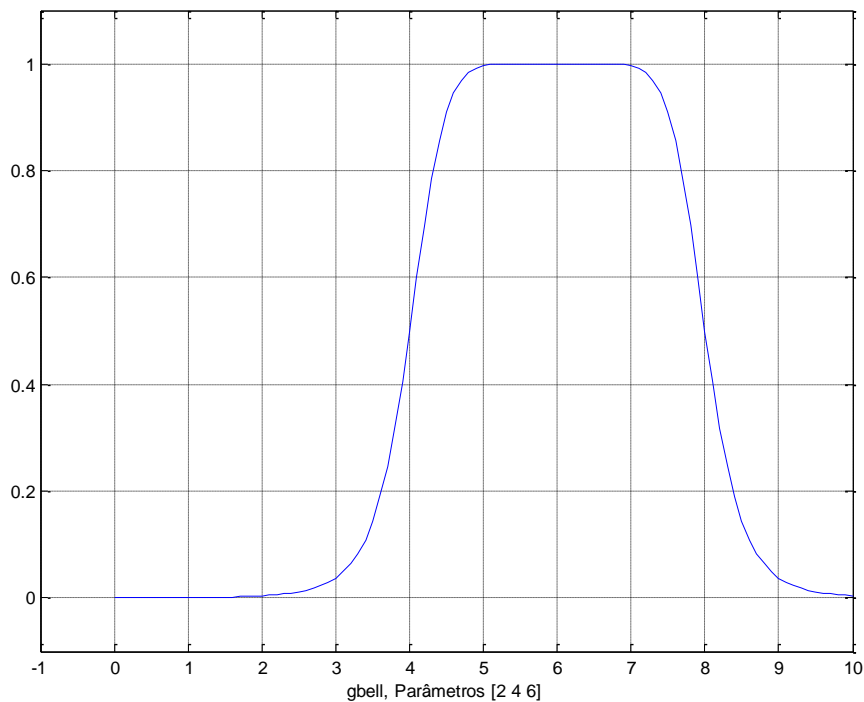
### 3.3.6. FORMA DE SINO

A função de pertença, normalizada em forma de sino, *gbellmf* (Figura 43), é descrita pela função:

$$f(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{(x - c)}{a} \right|^{2b}} \quad (3.36)$$

Nesta função o parâmetro  $b$  é normalmente positivo, o parâmetro  $c$  localiza-se no centro da curva. O vetor de parâmetros da função de pertinência *gbellmf*, surge na seguinte forma  $[a \ b \ c]$ , e tem como sintaxe:

```
>> x = 0:0.1:10;  
>> y = gbellmf(x, [2 4 6]);  
>> plot(x,y);  
>> xlabel('gbell, Parâmetros [2 4 6]')  
>> grid on  
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])
```



**Figura 43 Função de pertinência Sino**

### 3.3.7. FUNÇÃO DE PERTENÇA II

Segue-se a função *pimf* (Figura 44), designada de função de pertinência pi (devido à sua forma em "II"), cuja sintaxe é dada por:

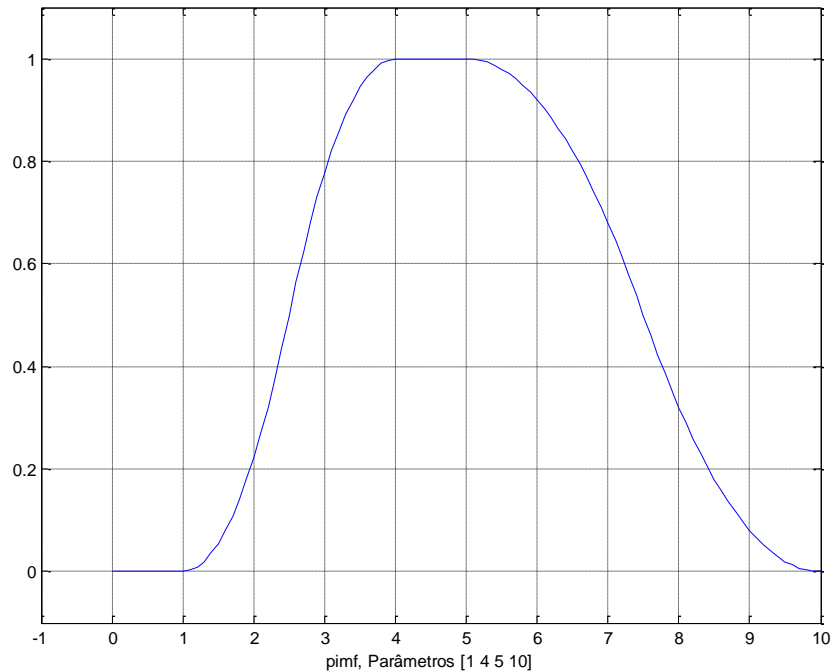
$$y = pimf(x, [a \ b \ c \ d])$$

Sendo *pimf* descrita em função dos valores do vetor  $x$ , os parâmetros  $a$  e  $d$  definem os pontos de quebra inferiores da curva, enquanto  $b$  e  $c$  definem os pontos de quebra superiores da curva, como se pode ver no exemplo:

```

>> x=0:0.1:10;
>> y=pimf(x,[1 4 5 10]);
>> plot(x,y)
>> xlabel('pimf, Parâmetros [1 4 5 10]')
>> grid on
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])

```



**Figura 44 Função de pertença Pi**

### 3.3.8. FORMA DE S

A função de pertença *smf* (Figura 45) é designada de função S, devido ao facto da curva que a descreve se moldar em forma de "S".

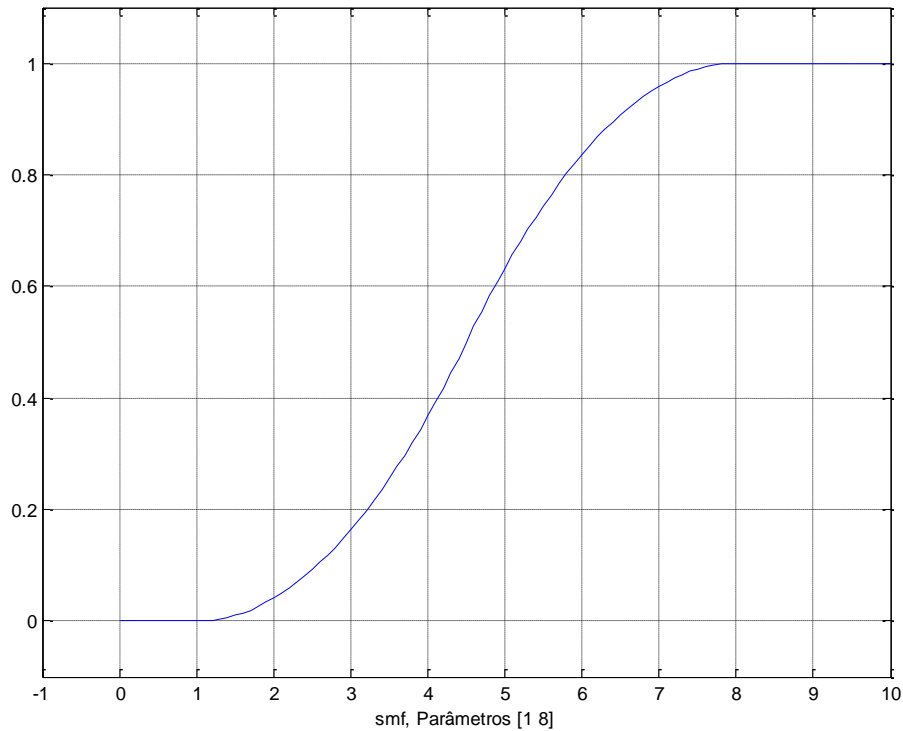
Esta função, tem os seus extremos definidos pelos parâmetros a e b, dos quais depende.

A sintaxe desta função de pertença é representada por:

$$y = smf(x, [a b])$$

De uma forma mais pormenorizada, e como exemplo temos:

```
>> x=0:0.1:10;  
>> y=smf(x,[1 8]);  
>> plot(x,y);  
>> xlabel('smf, Parâmetros [1 8]')  
>> grid on  
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])
```



**Figura 45** Função de pertinência S

### 3.3.9. TRAPEZOIDAL

De forma trapezoidal, a função de pertinência *trapmf* (Figura 46), assume uma curva trapezoidal, descrita em função do vetor x, dependendo de quatro parâmetros a, b, c e d em que a e d definem os pontos de quebra inferiores do trapézio ("pés") e os parâmetros b e c definem os pontos de quebra superiores ("ombros") do mesmo, sendo descrita por:

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (3.37)$$

Esta função pode, de uma forma mais compacta, ser definida como:

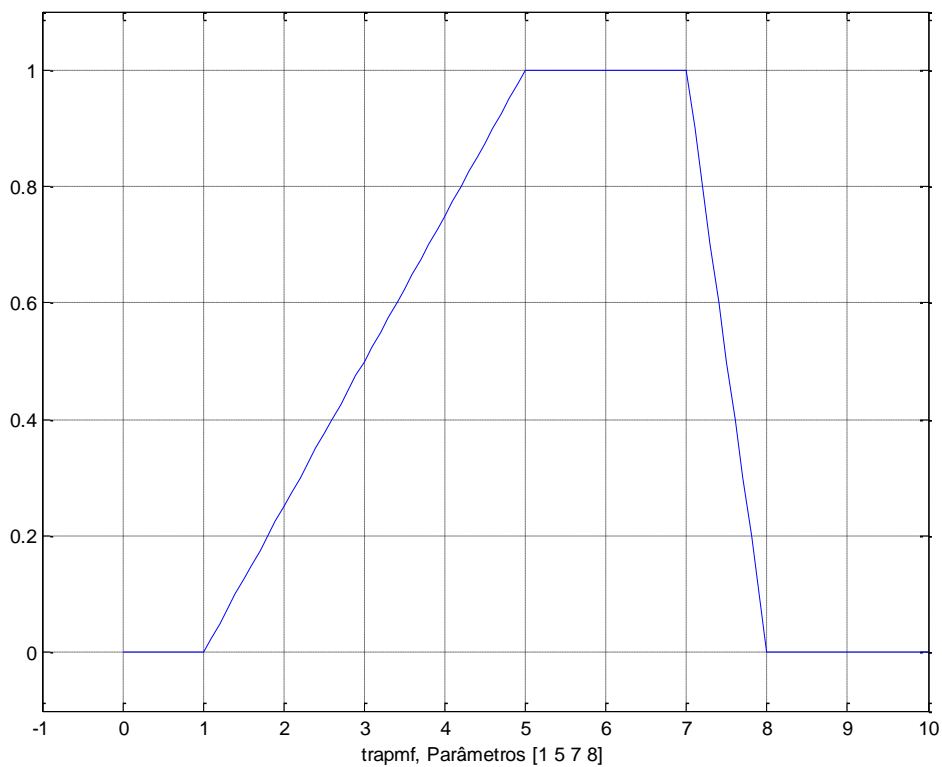
$$f(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$

A sua sintaxe é dada por:

$$y = \text{trapmf}(x, [a \ b \ c \ d])$$

Então através do uso do MATLAB, temos que:

```
>> x=0:0.1:10;  
>> y=trapmf(x,[1 5 7 8]);  
>> plot(x,y)  
>> xlabel('trapmf, Parâmetros [1 5 7 8]')  
>> grid on  
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])
```



**Figura 46 Função de pertinência trapezoidal**

### 3.3.10. TRIANGULAR

A função *trimf* (na Figura 47) que é designada de função de pertença triangular, é descrita em função do vetor  $x$  e depende de três parâmetros escalares  $a$ ,  $b$  e  $c$ :

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3.38)$$

em que  $a$  e  $c$  definem os pontos de quebra inferiores ("pés"), da função e  $b$  o vértice da mesma.

Esta função, pode também ser definida de uma forma mais compacta como:

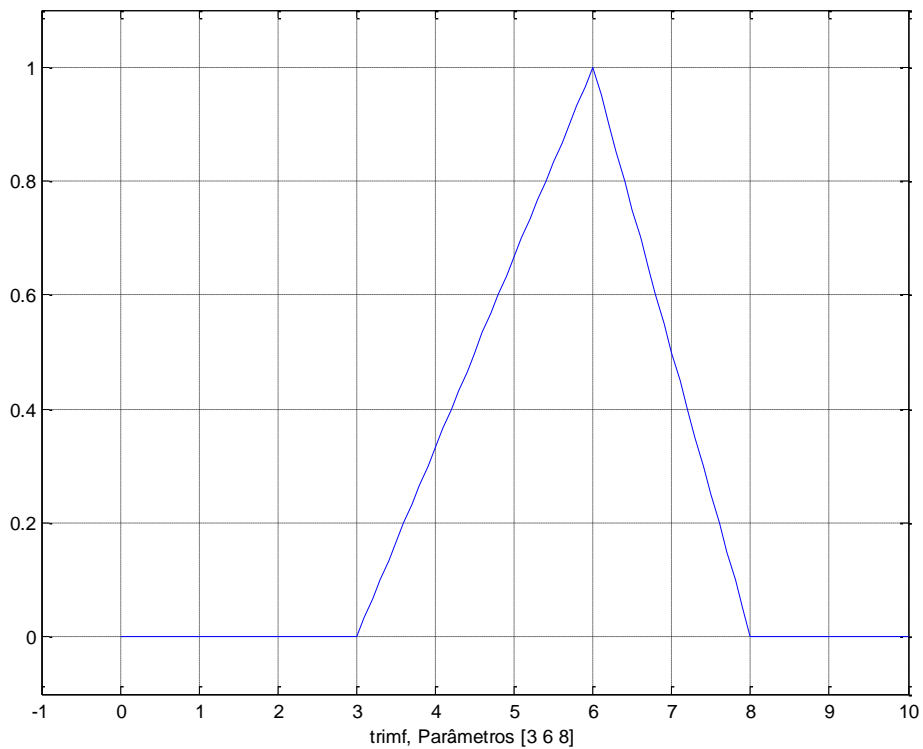
$$f(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (3.39)$$

A sua sintaxe é dada por:

$$y = \text{trimf}(x, [a \ b \ c \ d])$$

Então através do uso do MATLAB, temos que:

```
>> x=0:0.1:10;  
>> y=trimf(x,[3 6 8]);  
>> plot(x,y);  
>> xlabel('trimf, Parâmetros [3 6 8]');  
>> grid on  
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])
```



**Figura 47 Função de pertinência triangular**

### 3.3.11. FORMA DE Z

Finalmente, a função *zmf* (Figura 48) é designada por função de pertinência Z, devido à sua representação gráfica em forma de "Z".

Esta função é descrita em função dos valores do vetor *x* e depende dos parâmetros *a* e *b* que definem respetivamente os extremos da curva.

A função é descrita por:

$$f(x; a, b) = \begin{cases} 1, x \leq a \\ 1 - 2 \left( \frac{x - a}{b - a} \right)^2, a \leq x \leq \frac{a + b}{2} \\ 2 \left( b - \frac{x}{b - a} \right)^2, \frac{a + b}{2} \leq x \leq b \\ 0, x \geq b \end{cases} \quad (3.40)$$

sendo a sua sintaxe da forma:

$$y = zmf(x, [a b])$$

Exemplo usando o MATLAB:

```
>> x=0:0.1:10;  
>> y=zmf(x,[3 7]);  
>> plot(x,y);  
>> xlabel('zmf, Parâmetros [3 7]')  
>> grid on  
>> axis([-1 10 -0.1 1.1])
```

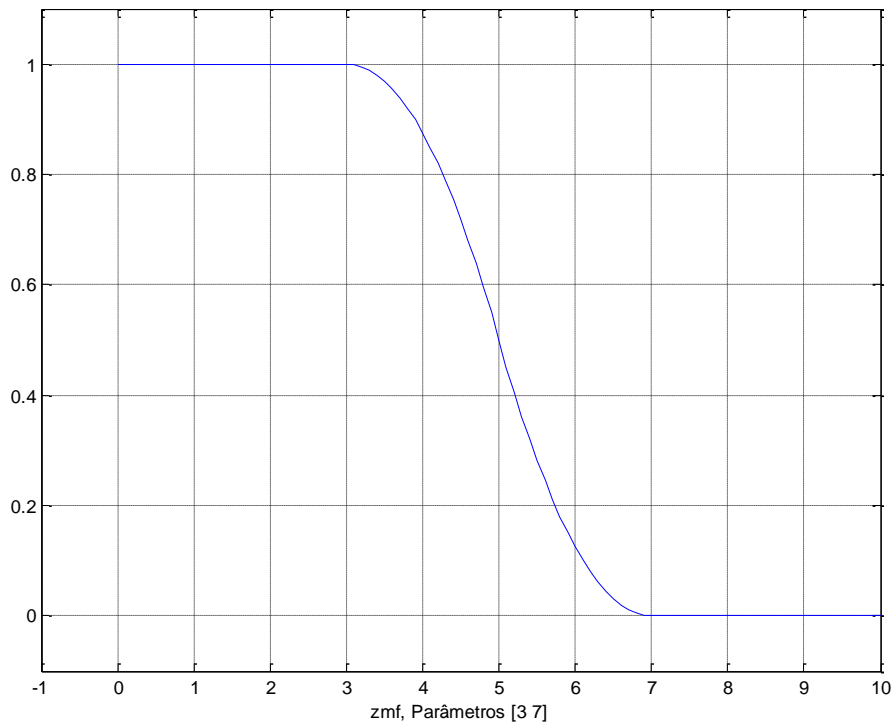


Figura 48 Função de pertinência Z

### 3.4. COLAPSO DE UM CONJUNTO DIFUSO

O conceito de colapso, está associado à conversão de um conjunto difuso num único valor real, rígido, que sob alguma perspectiva lhe seja equivalente ou representativo. Ou seja, este é o processo que normalmente está designado na literatura por desfuzificação. Em mecânica quântica, a agregação das ondas de probabilidade num único resultado designa-se por "colapso" - todos os futuros possíveis se convertem num único real.

Apresentaremos de seguida os seguintes métodos de colapsagem:

- Centro de massa / centro de área / centro de gravidade
- Centro das somas das áreas

- Centro da média das alturas / média dos máximos [IDL, 2000]

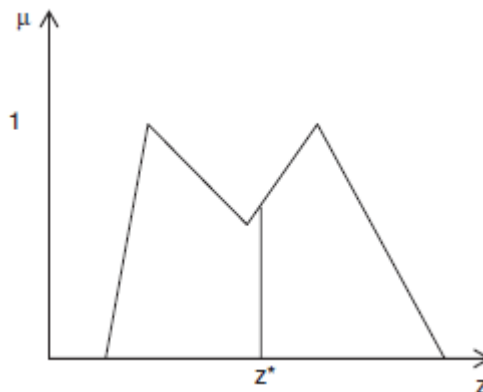
### 3.4.1. O COLAPSO PELO CENTRO DE MASSA

O colapso pelo centro de massa (ou centro de gravidade) é o método mais popular de todos. É o método mais utilizado pois consiste no cálculo da média dos pontos de valor de pertinência não nulo pesada pela importância do respetivo valor de pertinência.

Se a função de pertinência do conjunto difuso U (ou Z) for designada como  $\mu(U)$  (ou  $\mu(Z)$ ), então o centro de massa  $u^*$  (ou  $z^*$ ), correspondente ao valor a tomar como valor colapsado de U, será dado por:

$$u^* = \frac{\int_U u \cdot \mu(u) du}{\int_U \mu(u) du}$$

A figura seguinte (Figura 49) ilustra a aplicação do método. Note-se que a área sobreposta dos dois subconjuntos truncados é contada uma única vez.



**Figura 49** Colapso pelo centro de massa [Sivanandam, 2007]

O inconveniente deste método é ser computacionalmente exaustivo e portanto às vezes na prática há uma certa resistência em adotá-lo.

É fácil demonstrar-se que o centro de massa de alguns conjuntos difusos é dado pelas expressões inseridas na Tabela 3.

**Tabela 3 Método centro de massa para diversos tipos de conjuntos difusos**

<b>Conjunto Difuso</b>	<b>Centro de massa</b>
Triângulo	$g = \frac{a + m + b}{3}$ $h = \frac{1}{3}\mu(m)$
Trapézio	$g = \frac{(c^2 - b^2) + (d^2 - a^2) + cd - ab}{3(d - a + c - b)}$ $h = \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3} \frac{d - a}{d - a + c - b}\right) \mu(b)$
Retângulo	$g = \frac{a + b}{2}$ $h = \frac{1}{2}\mu(a)$

Quando a forma da função de pertença é complexa, como é o caso da figura anterior, uma forma expedita de calcular-lhe o centro de massa é dividir a área sob a curva em áreas elementares. Seja  $g_i$  o centro de massa da área elementar  $i$ , e seja  $A_i$  a respetiva área.

Então, o centro de massa  $G$  da figura complexa pode obter-se por [IDL, 2000]:

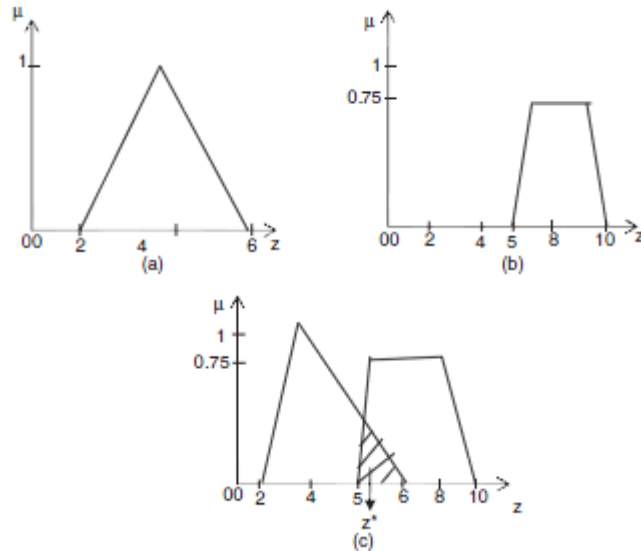
$$G = \frac{\sum_i g_i A_i}{\sum_i A_i}$$

### **3.4.2. COLAPSO PELO CENTRO DOS CENTROS DAS ÁREAS**

Para abreviar os cálculos, algumas aplicações práticas, em vez de trabalharem com base no conjunto difuso  $U$ , baseiam os seus cálculos nas áreas dos conjuntos truncados definidas por  $\mu_{TR}^{(k)}(u)$ . Estas são áreas trapezoidais de rápido cálculo. A expressão que dá o valor colapsado  $u^*$  é:

$$u^* = \frac{\sum_k \int_U u \cdot \mu_{TR}^{(k)}(u) du}{\sum_k \int_U \mu_{TR}^{(k)}(u) du}$$

Isto corresponde a calcular o centro de massa dos centros de massa de cada área individual. Neste caso, as áreas sobrepostas de dois conjuntos truncados contam duas vezes, como se vê na Figura 50 [IDL, 2000].



**Figura 50** Método do centro da soma das áreas (a) primeira função de pertinência; b) segunda função de pertinência; c) método de colapso [Sivanandam, 2007]

### 3.4.3. COLAPSO PELA MÉDIA DOS MÁXIMOS

Este método (Figura 51), ainda mais eficiente computacionalmente, calcula a média pesada dos máximos de cada subconjunto truncado. Como em cada um destes o máximo corresponde a um intervalo, toma-se o ponto central desse intervalo. Seja pois  $c^{(k)}$  o ponto central do máximo do subconjunto difuso ( $k$ ). O seu valor de pertinência é portanto, o máximo atingido nesse subconjunto:  $\mu(c^{(k)}) = \max\{\mu(u)\}$ . O valor colapsado do conjunto é calculado por:

$$u^* = \frac{\sum_k c^{(k)} \cdot \mu(c^{(k)})}{\sum_k \mu(c^{(k)})}$$

Na figura seguinte (Figura 51), representa-se graficamente este método [IDL, 2000].

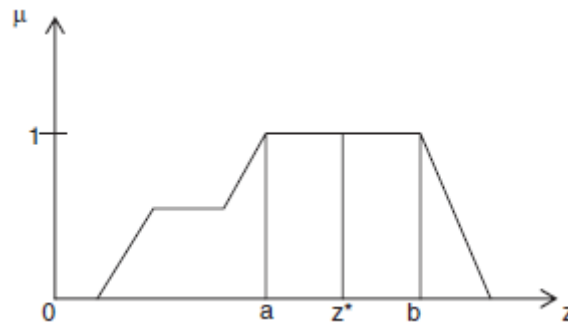


Figura 51 Colapso pela média dos máximos [Sivanandam, 2007]

### 3.5. CONTROLO E AUTOMAÇÃO

A automação é uma tecnologia dinâmica que está em contínua evolução. Alguns especialistas chegam a afirmar que esse processo de evolução terá começado na revolução industrial, quando as máquinas começaram a realizar trabalho que até aí era realizado por pessoas, artesanalmente. A automação traduz-se então num processo de desenvolvimento tecnológico que irá continuar a avançar no futuro, pois está relacionada com a aplicação de sistemas mecânicos, eletrônicos e sistemas de computação, de modo a serem possíveis a operação e o controlo de produção.

#### 3.5.1. SISTEMAS DE CONTROLO E EVOLUÇÃO HISTÓRICA

O controlo automático traduz-se num avanço científico em diversas áreas, como aeronáutica, militar, indústria, etc., através de ações como controlo de pressão, temperatura, humidade, viscosidade e fluxo, manuseando, operando e montando partes mecânicas das indústrias de fabricação, entre muitas outras. Os avanços na teoria assim como na prática do controlo automático, propiciam meios de forma a serem atingidos desempenhos ótimos em sistemas dinâmicos, tais como o melhoramento da qualidade, a diminuição do custo de produção e o aumento da taxa de produção.

Na área do controlo automático, James Watt, é aquele que está considerado como tendo sido o primeiro a realizar um trabalho nesta área, pois construiu um controlador centrífugo para o controlo da velocidade de uma máquina a vapor no século XVIII. Em 1922, Minorsky trabalhou num projeto de controladores automáticos para pilotagem de navios e mostrou como poderia ser “determinada” a estabilidade a partir das equações diferenciais que descrevem o sistema. Em 1932 Nyquist foi o responsável pelo desenvolvimento de um procedimento que permite determinar a estabilidade de sistemas em malha fechada com

base na resposta a entradas sinusoidais em regime permanente e malha aberta. Em 1934, Hazen, através de um projeto de servomecanismos para controlo de posição, desenvolveu servomecanismos a relé, capazes de seguir de muito perto uma entrada variável.

A partir de 1940, os métodos de resposta em frequência tornaram possível aos engenheiros projetar sistemas de controlo realimentados lineares, que satisfaziam os requisitos desejados para executarem as ações pretendidas. Desde o final da década de 40 até ao início da década seguinte (50), o método do lugar de raízes em projetos de sistemas de controlo foi completamente desenvolvido.

Os métodos de resposta em frequência e lugar de raízes são a base da teoria de controlo clássica e conduziram ao desenvolvimento de sistemas estáveis com desempenho satisfatórios, não sendo geralmente considerados ótimos.

Em resultado do aumento da complexidade dos processos modernos, a descrição de um sistema de controlo moderno exige um grande número de equações. Para sistemas de múltiplas entradas e saídas, a teoria de controlo clássica torna-se impotente para obter níveis de desempenho desejáveis. Desde 1960, a teoria de controlo moderna tem sido desenvolvida para competir com a complexidade crescente de processos modernos e requisitos rigorosos e estreitos em fatores como a precisão, o peso e o custo em aplicações militares, espaciais e industriais.

Através da utilização de computadores digitais, analógicos e híbridos eletrónicos para uso em cálculos complexos, a utilização de computadores no projeto de sistemas de controlo e o uso de computadores *on-line* na operação de sistemas de controlo constituíram uma prática comum a partir de 1970. Os desenvolvimentos a partir desta data na teoria de controlo moderno, foram na direção do controlo ótimo em sistemas determinísticos assim como em sistemas estocásticos, bem como para controlo adaptativo de sistemas complexos. Existem diversas áreas que beneficiam deste controlo: engenharia, biologia, economia, medicina, sociologia, etc [Ogata, 1970] [Groover, 1987].

### **3.5.2. CONTROLO NÃO LINEAR ROBUSTO**

Um Controlador PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo) clássico, revela um bom comportamento no ponto de funcionamento e na sua vizinhança para a qual foi sintonizado, mas no caso de ocorrerem perturbações o seu desempenho não é satisfatório.

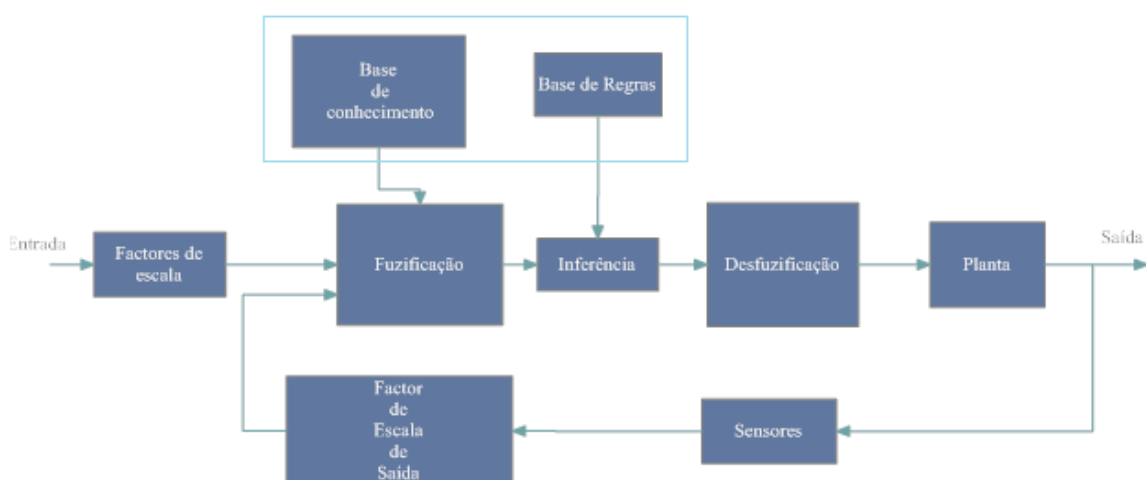
É possível desenvolver aplicações de controlo difuso que tornam o comportamento dos controladores PID excelentes na ocorrência de perturbações, estabelecendo o compromisso que os controladores PID têm de respeitar entre uma resposta rápida e uma sobreelongação (*overshoot*) não demasiado elevados, assim como entre uma resposta suave e uma reação que não seja lenta em demasia [ILD, 2000].

### 3.6. CONTROLADORES LÓGICOS DIFUSOS

O sucesso dos controladores lógicos difusos, normalmente, está relacionado com a sua capacidade de abranger o conhecimento representado numa forma linguística, em vez de uma exposição num modelo matemático convencional, tradicionalmente utilizado por engenheiros de controlo na sua arquitetura de projetos. Contudo, quanto mais complexo for um sistema menos eficaz será o modelo matemático. Este é o conceito fundamental que motivou Lotfi Zadeh, a desenvolver a teoria dos conjuntos difusos.

Os problemas do mundo real podem ser extremamente complexos e os sistemas são inerentemente difusos. A principal vantagem dos controladores difusos, está na capacidade de conseguirem incorporar experiência, intuição e heurísticas no sistema em vez de se basearem em modelos matemáticos. Isto torna-os mais eficazes em aplicações onde os modelos existentes são mal definidos ou não são suficientemente fiáveis.

Na figura seguinte (Figura 52) está representado, através de um diagrama de blocos um típico controlador lógico difuso, onde estão representados diversos elementos indispensáveis ao funcionamento deste:



**Figura 52 Diagrama de blocos de um controlador lógico difuso**

Existem cinco elementos principais num controlador deste tipo:

- Módulo de fuzificação;
- Base de conhecimento;
- Regras;
- Mecanismo de inferência;
- Módulo de desfuzificação.

O **módulo de fuzificação** converte valores rígidos das entradas de controlo em valores difusos, de tal modo que eles são compatíveis com a representação da base de regras características do conjunto difuso. A escolha da estratégia de fuzificação é dependente do mecanismo de inferência, isto é, ou é baseado em composição ou em regras individuais.

A **base de conhecimento** é o suporte de dados do sistema, fornecendo todas as definições necessárias para que o processo de fuzificação possa ocorrer, como por exemplo funções de pertença, representação do conjunto difuso das variáveis de entrada e de saída assim como das funções de mapeamento entre os domínios físico e difuso.

As **regras** são essenciais para a estratégia de controlo do sistema, sendo normalmente obtidas através do conhecimento de peritos ou por métodos heurísticos e expressam-se num conjunto de regras do tipo: **SE antecedente ENTÃO consequente**. As regras baseiam-se no conceito de inferência difusa e os seus antecedentes e consequentes estabelecem a ligação entre si através de variáveis linguísticas [NFLCDPS, 2002].

Após o raciocínio difuso, existe uma variável linguística de saída que necessita de ser traduzida num valor rígido, neste ponto do processo atingimos a fase da **desfuzificação**.

O objetivo é obter um único valor numérico que melhor represente os valores da inferência dos valores difusos da variável linguística de saída. A desfuzificação é um processo que mapeia a saída de domínio difuso num domínio numérico anterior ao processo de fuzificação. Alguns métodos de desfuzificação tendem a produzir uma saída que integra todos os elementos resultantes do conjunto difuso, atendendo aos pesos correspondentes. Outros métodos, têm em conta apenas os elementos correspondentes aos pontos máximos

das funções de pertinência resultantes. Os seguintes métodos de desfuzificação são de uma importância prática relevante:

**Método de centro de área** (*Center-of-Area (C-o-A)*), muitas vezes denominado por centro de gravidade - centróide, pois é calculado o centro de gravidade da área composta que representa o termo da saída difusa.

Outro método utilizado é designado por **Centro dos Máximos** (*Center-of-Maximum (C-o-M)*), em que apenas são utilizados no cálculo os valores máximos das funções de pertinência. O valor desfuzificado é determinado através da descoberta do local onde os pesos estão equilibrados. Assim, as áreas das funções de pertinência não desempenham nenhum papel neste processo e apenas os máximos são utilizados (função de pertinência *singleton*). O resultado é calculado pela ponderação do termo de pertinência máximo, medido pelos resultados da inferência.

(*Mean-of-Maximum (M-o-M)*), é outro método, que é utilizado em apenas alguns casos onde a abordagem C-o-M não funciona. Isto ocorre sempre que a máxima das funções de pertinência não é única, e a questão a resolver é por qual das escolhas se deve optar [DEEPA,2007].

### **3.6.1. DIMINUIÇÃO DO TEMPO DE DESENVOLVIMENTO E DE MANUTENÇÃO**

A relativa simplicidade que envolve os conceitos inerentes ao desenvolvimento de um controlador difuso, permite a obtenção rápida de soluções, comparativamente aos controladores clássicos. Podem inclusive, conceber-se controladores difusos que aprendam durante o seu funcionamento, melhorando o seu desempenho de forma autónoma [ILD, 2000].

### **3.6.2. MARKETING E PATENTES**

O controlo difuso foi aplicado com sucesso considerável inicialmente em eletrodomésticos no Japão e nos EUA, de tal forma que a palavra “fuzzy” era sinónimo de equipamentos inteligentes e da simplicidade de operações para o utilizador. A utilização de interfaces amigáveis com o utilizador, em que o utilizador não necessita de muitas interações com a máquina, estando esta provida de sensores que lhe permitem tomar decisões de forma a obter um bom desempenho permitiu o desenvolvimento desta tecnologia.

### **3.6.3. LIMITES DO CONTROLO DIFUSO**

É de salientar que existem casos de insucesso na aplicação destes algoritmos, em especial devido a uma excessiva simplicidade no projeto de controladores. A naturalidade e acessibilidade de determinados conceitos da teoria dos conjuntos difusos, induz facilmente em possíveis desilusões.

Uma base sólida de engenharia de controlo, é o caminho a seguir na aplicação de técnicas de controlo difuso, pois além dos fundamentos teóricos das técnicas difusas, é necessária a compreensão das reações dos sistemas e das razões que as originam, assim como das formas de estabilização dos sistemas, insensibilização ao ruído, etc.

Embora já exista uma base teórica importante que justifica o uso de controladores difusos, existem aspetos teóricos que ainda não estão plenamente compreendidos e aprofundados, pelo que continuam a ser efetuados vários estudos visando a obtenção destes propósitos [ILD, 2000].

### **3.7. CONCLUSÕES**

Em jeito de conclusão, o conceito de lógica difusa, embora com dificuldades em inicialmente ser aceite, com o surgimento ao longo das últimas décadas de aplicações eficientes nas mais diversas áreas, tornou-se num conceito a explorar bastante atrativo. Entre as diversas aplicações, a inteligência artificial tem-se destacado uma vez que através de analogias com sistemas biológicos, por exemplo, torna possível descrever sistemas a partir da forma através da qual os seres humanos realizam tarefas de controlo, conseguem reconhecer padrões ou tomam decisões.

Contudo, permanece a necessidade de haver uma especial atenção quanto à excessiva simplicidade no projeto de controladores, que pode levar ao insucesso na aplicação da técnica de controlo difuso. É necessário o aprofundamento teórico, nomeadamente na correta utilização dos parâmetros de um controlador difuso, para uma aquisição produtiva de resultados.



# 4. SISTEMA DE CONTROLO DIFUSO COM BASE EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

## 4.1. INTRODUÇÃO

O sistema desenvolvido (Figura 53), será apresentado ao longo deste capítulo. Este é constituído por um sistema de inferência difusa, através do qual, se realiza o controlo por modelação de energias renováveis como a solar e a eólica, sendo este o suporte de todo o trabalho. Os dados relativos ao vento e ao sol, são adquiridos via *internet* através do acesso à estação meteorológica “*Meteogalicia*” (<http://www.meteogalicia.es>), sendo os ficheiros obtidos em formato "xml", para posteriormente serem trabalhados em ambiente MATLAB. Por fim, através de uma *Interface* Homem-Máquina, realizada em ambiente gráfico de MATLAB (GUIDE) são apresentados os resultados obtidos [MATLAB, 2009].

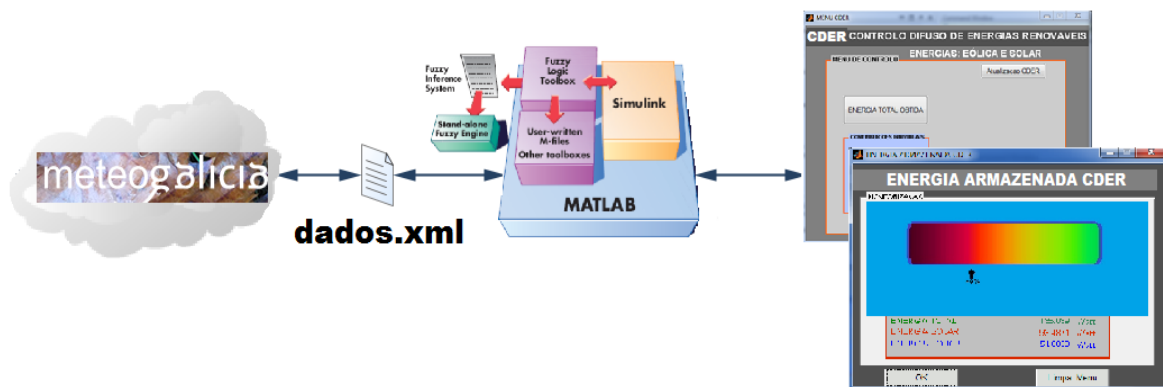


Figura 53 Arquitetura do sistema desenvolvido

## 4.2. SIMULAÇÃO DIFUSA EM MATLAB

O software MATLAB, é uma ferramenta que entre outras propriedades permite a simulação de modelos matemáticos.

No caso em concreto, possui uma biblioteca denominada por *Fuzzy Logic Toolbox* que possui num grupo de funções que permitem construir e editar sistemas de inferência difusa. O que torna esta *toolbox* num software poderoso nesta área é o facto de grande parte do raciocínio humano assim como o molde em que decorre a formação de conceitos relacionarem-se com a utilização de regras difusas. Com a precaução da elaboração de uma estrutura computacional baseada em regras difusas, esta *toolbox* amplifica o poder do raciocínio humano, o que se deve à ajuda fundamental das ferramentas gráficas que tornam este software especializado na área.

Na Figura 54, está representado o ambiente de natureza integrativa que caracteriza o MATLAB:

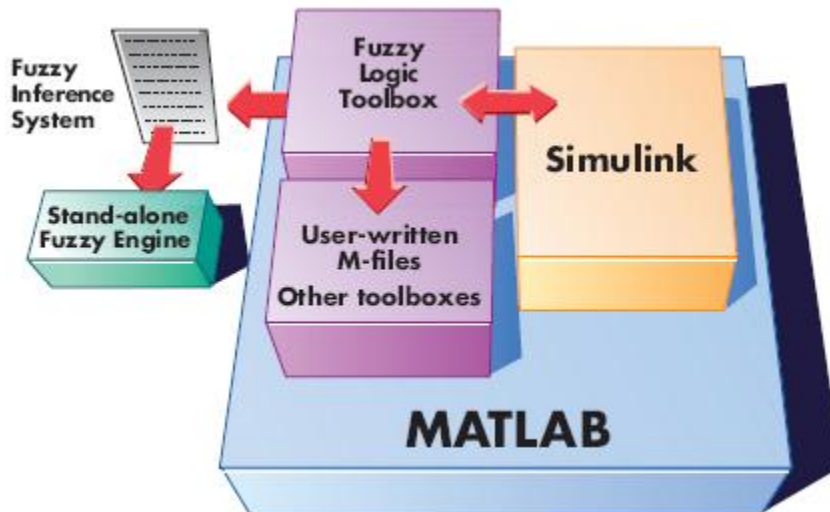


Figura 54 Estrutura MATLAB [MATLAB, 2009]

Devido a esse fator de integração, é exequível a construção de novas ferramentas difusas para aperfeiçoamento da *toolbox* ou relacioná-las com outras *toolbox* existentes assim como a construção de redes neurais, entre outras variadas possibilidades.

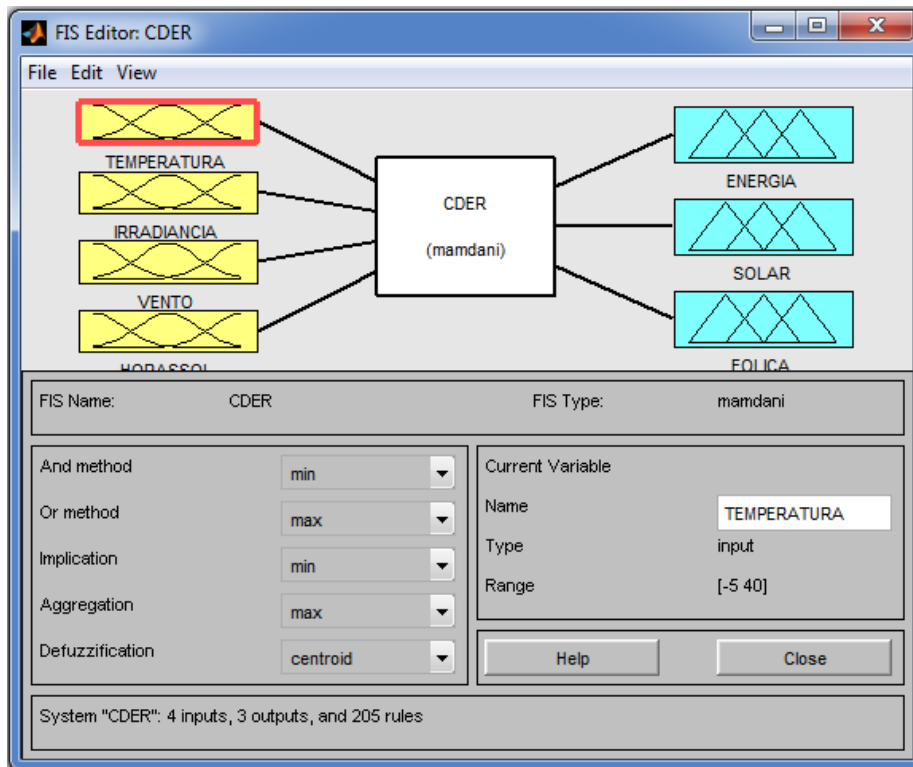
#### 4.3. SISTEMA DE INFERÊNCIA DIFUSA (FIS)

Partindo dos conceitos explanados nos capítulos anteriores, foi possível desenvolver um controlador aplicando raciocínio difuso, o qual é constituído por um conjunto de funções de pertinência, variáveis linguísticas, e por uma base de regras, permitindo após o processo de colapsagem a visualização das variáveis de saída do sistema.

Através da biblioteca do MATLAB, *Fuzzy Inference System* (FIS), e aplicando o método de inferência de Mamdani, foi construído o controlador do sistema [MATLAB, 2009].

Analisando as possibilidades de desenvolvimento desta ferramenta, verifica-se que o FIS divide-se em módulos de edição como: o editor FIS, o editor de funções de pertinência e o editor de regras.

No editor FIS, representado na Figura 55, estão assentes as variáveis de entrada (a amarelo) e as de saída (a azul), o método de inferência (*FIS Type*) assim como o método de colapsagem utilizado (*Defuzzification*).



**Figura 55 Editor FIS**

Com o editor de funções de pertença (Figura 56), foram definidas as variáveis FIS de entrada e de saída, sendo a cada variável atribuída a devida função de pertença (*gaussmf* e *trimf* respectivamente), assim como, a sua gama de valores (Range). Também neste editor, partindo de cada uma das variáveis é possível definir o intervalo de valores que cada função de pertença abarca.

Finalmente, na Figura 57, está ilustrado o editor de regras que permitiu a criação da base de regras que comanda o sistema difuso. Neste módulo, os conjuntos difusos de cada variável de entrada são relacionados através dos operadores lógicos *and*, *or* e *not*, produzindo desta forma as saídas que correspondem a um determinado conjunto difuso. Para cada regra definida é possível atribuir um grau de pertença (*weight*) entre 0 e 1.

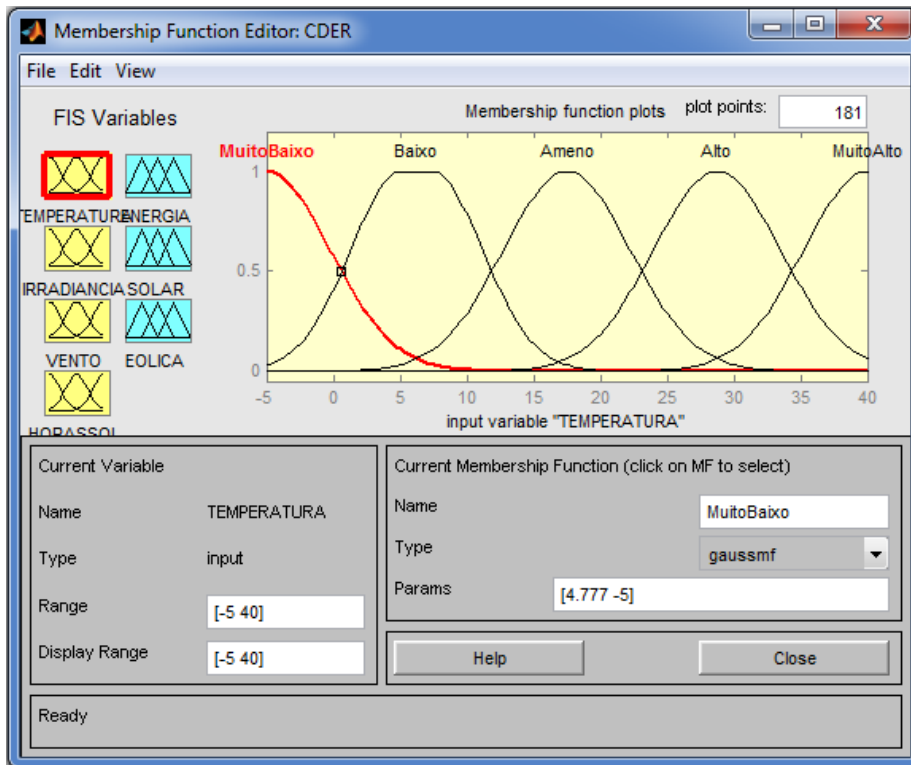


Figura 56 Editor de funções de pertença

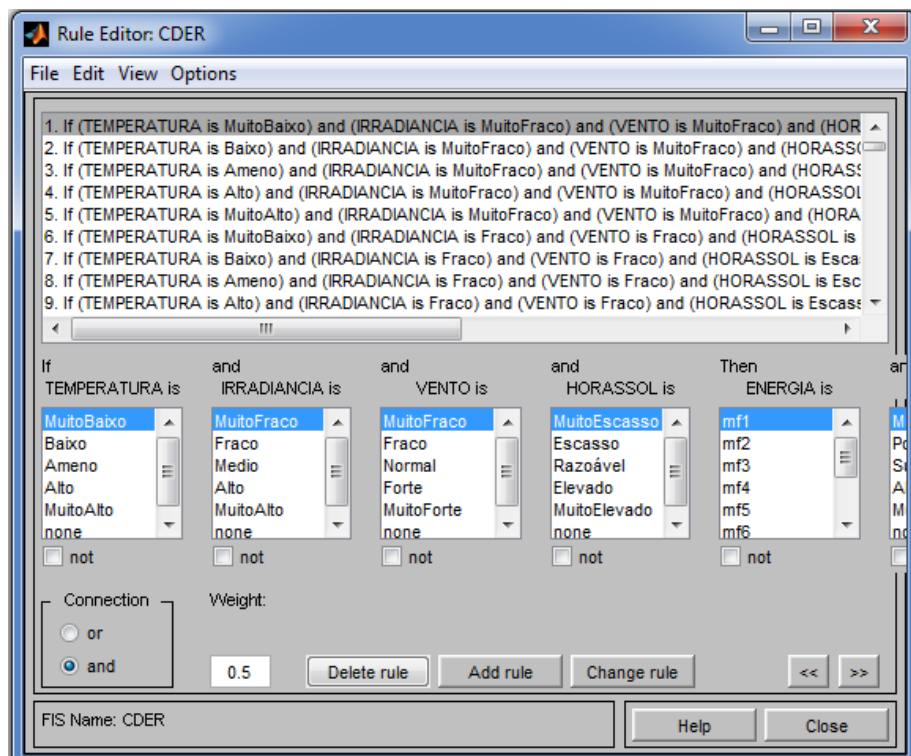


Figura 57 Editor de regras

O sistema desenvolvido possui quatro variáveis difusas de entrada, uma base de regras e três variáveis difusas de saída. O nome atribuído ao sistema de inferência foi CDER, sendo este, uma sigla que designa o título: "Controlo Difuso de Energias Renováveis". O método de inferência utilizado foi o de Mamdani.

#### 4.3.1. SISTEMA DE INFERÊNCIA DIFUSA CDER

Como se pode visualizar na Figura 55 também na Figura 56, são atribuídos os nomes das variáveis de entrada/saída, bem como designado o tipo de função de pertença utilizado por cada variável, e ainda, os métodos de inferência utilizados tal como o número de regras que o sistema possui.

As variáveis difusas de entrada utilizadas são: a temperatura média do ar (TEMPERATURA), a irradiação global diária (IRRADIANCIA), a velocidade do vento (VENTO) e as horas de sol (HORASSOL); as variáveis de saída são, a energia total produzida (ENERGIA), e as contribuições individuais de cada uma das fontes renováveis, nomeadamente a proveniente do painel solar (SOLAR) e a do aerogerador (EOLICA). Aqui foram definidos os métodos do processo de inferência difuso utilizados em cada uma das variáveis, tendo sido selecionadas as seguintes opções, dentro das disponibilizadas:

**"And method"**: permite a escolha de uma das opções "min" (mínimo), "prod" (produto);

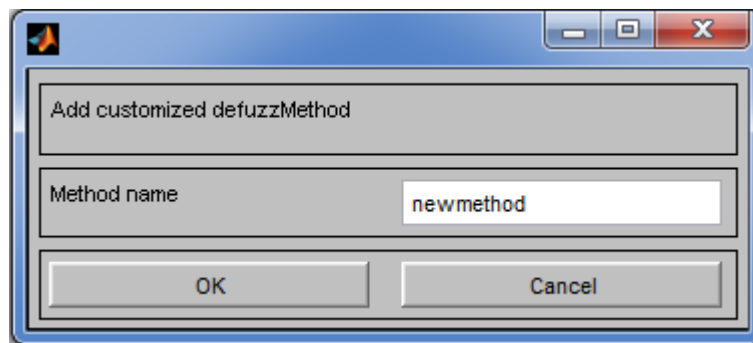
**"Or method"**: possibilita escolher uma opção entre "max" (máximo), "probor" (probabilístico ou);

**"Implication"**: admite a escolha de uma das opções, entre "min" (mínimo), "prod" (produto);

**"Aggregation"**: para esta última etapa da parte inicial do processo de inferência difusa pode ser selecionada uma das opções "max" (máximo), "sum" (soma), "probor" (probabilístico ou);

**"Defuzzification"**: para obter o colapso da inferência difusa de Mamdani, são facultadas as opções "centroid" (centro das áreas), "bisector" (bissetor), "mom (media dos máximos), "som" (menor dos máximos), "lom" (maior dos máximos). Para além das opções referidas, quer para a fuzificação quer para o processo de colapsagem existe ainda a possibilidade de

optar por uma forma personalizada para o método de inferência difusa "custom" (Figura 58).



**Figura 58 Método personalizado**

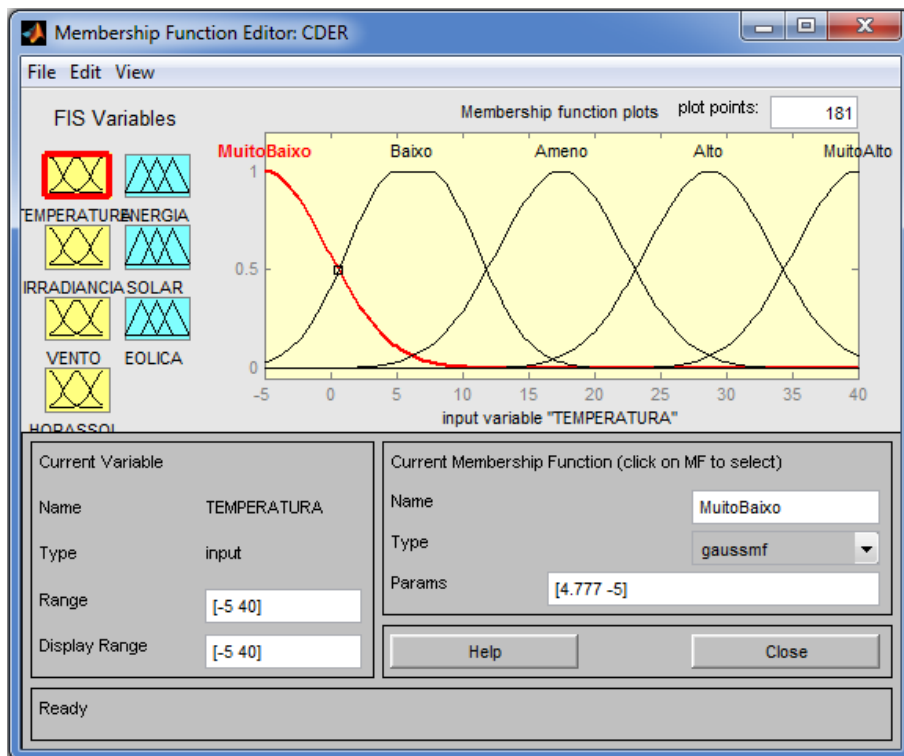
Importa salientar, que conforme já foi referido foram descritas estas opções, para o método de inferência de Mamdani.

As opções seleccionadas, presentes na Figura 55 e na Figura 56, são as que se aplicaram na versão final deste trabalho, pois foi a partir destas que surgiram os resultados mais fiáveis, quando comparados com os esperados. Daqui se depreende que anteriormente foram testadas outras opções, visando estudar quais as melhores opções a serem aplicados ao sistema, ou seja, as que resultariam num melhor desempenho do mesmo.

#### **4.3.2. VARIÁVEIS DE ENTRADA DO SISTEMA DIFUSO CDER**

A Figura 59 exhibe o editor de funções de pertença, que possibilita visualizar a partir das variáveis de entrada e de saída os conjuntos difusos definidos para cada uma das variáveis, assim como, as funções de pertença respetivas. Com se pode observar foi determinado para cada variável de entrada uma função de pertença gaussiana (*gaussmf*) esta função já foi anteriormente esplanada no capítulo anterior, o capítulo 4. Ainda nesta figura (Figura 59), a variável de entrada "TEMPERATURA", distribui-se por uma gama de valores compreendidos entre -5°C e 40°C na qual estão definidos cinco conjuntos difusos, a saber:

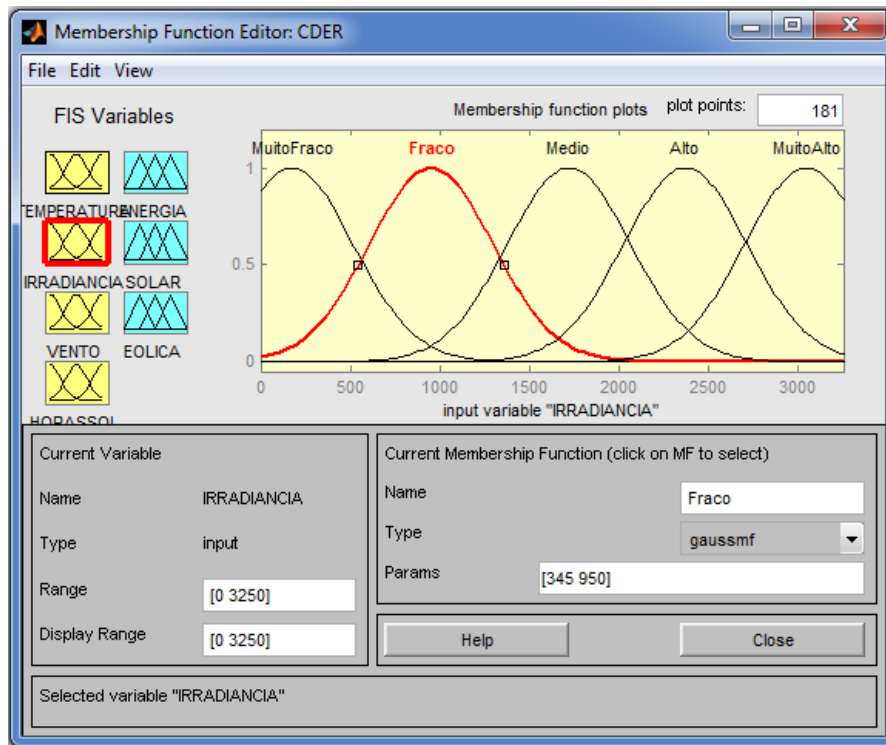
"MuitoBaixo", "Baixo", "Ameno", "Alto"; "MuitoAlto".



**Figura 59** Descrição da variável difusa de entrada **TEMPERATURA**

A variável de entrada IRRADIANCIA, está ilustrada na Figura 60, em que, tal como na variável anteriormente descrita, podemos observar a forma sob a qual foi determinada a distribuição das variáveis linguísticas ao longo da escala definida (0 - 3250 KJ/m<sup>2</sup>), tendo sido assumidas as variáveis:

"MuitoFrac", "Frac", "Medio", "Alto", "MuitoAlto".



**Figura 60** Descrição da variável difusa de entrada IRRADIANCIA

A Figura 61 apresenta detalhadamente as características utilizadas para a variável de entrada VENTO, em que, tal como nas variáveis até agora descritas, foi utilizado o vocabulário corrente da linguagem do nosso quotidiano para descrever a velocidade do vento:

"MuitoFraco", "Fraco", "Normal", "Forte", "MuitoForte".

Esta variável afetará a saída eólica do sistema difuso desenvolvido.

Por fim, quanto a variáveis de entrada, resta falar em HORASSOL (Figura 62), que é utilizada precisamente para elucidar sobre o número de horas de sol por dia (logo com uma gama de valores de 0 a 24 horas). Esta, tal como as variáveis TEMPERATURA e IRRADIANCIA, condicionam a saída do sistema difuso referente à componente solar.

É de salientar que as gamas de valores atribuídas foram determinadas por observação dos valores anuais característicos relativamente à Temperatura, à Irradiação, à Velocidade do vento e também às horas de sol.

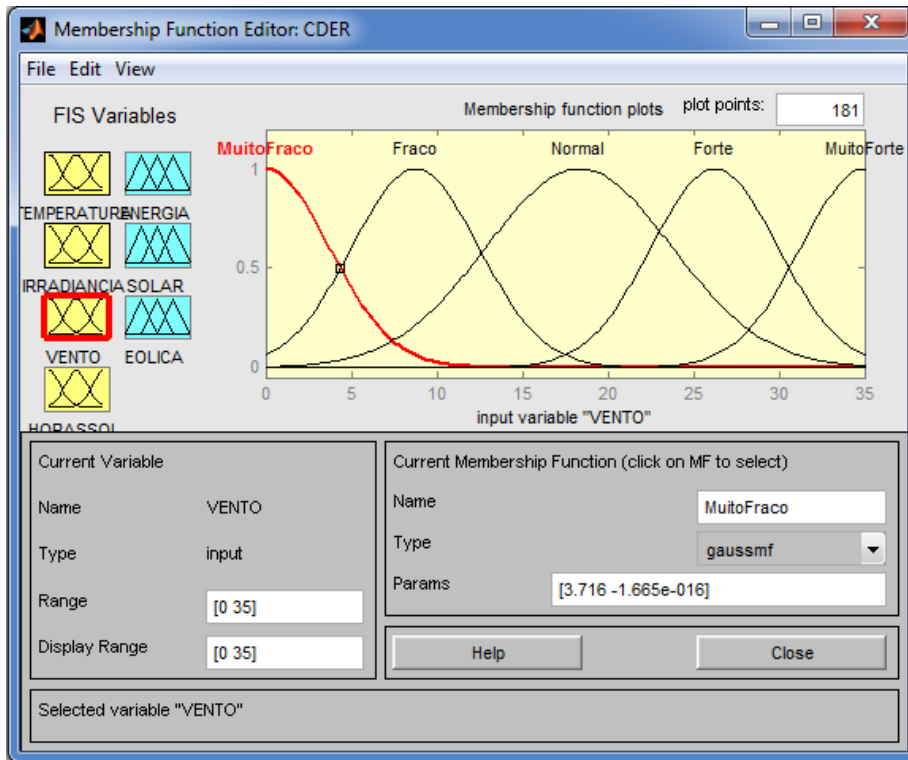


Figura 61 Descrição da variável difusa de entrada VENTO

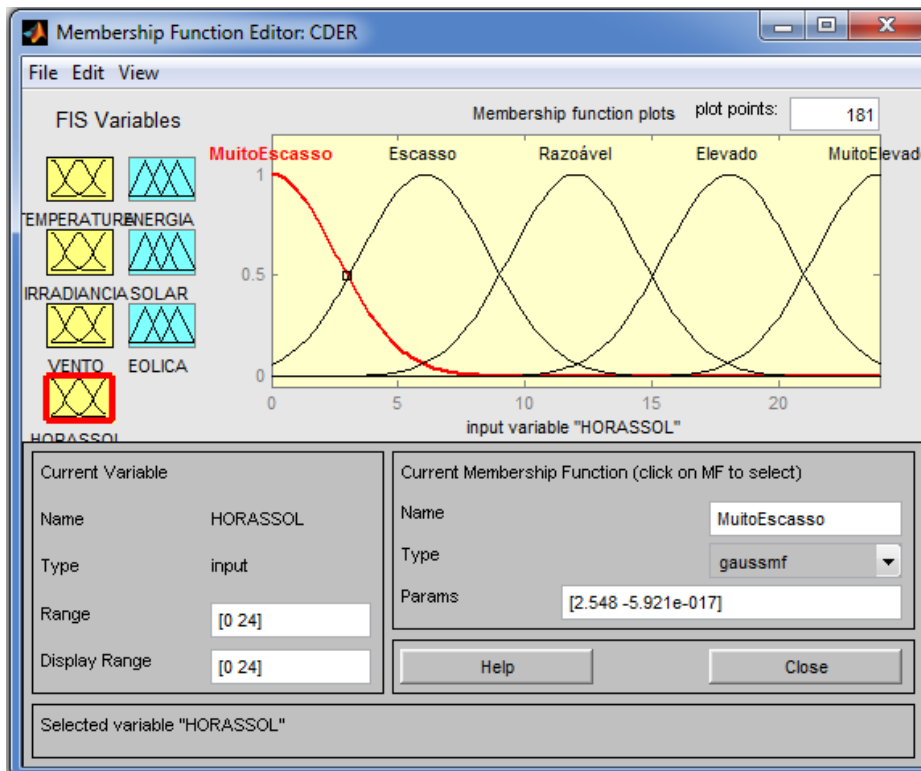
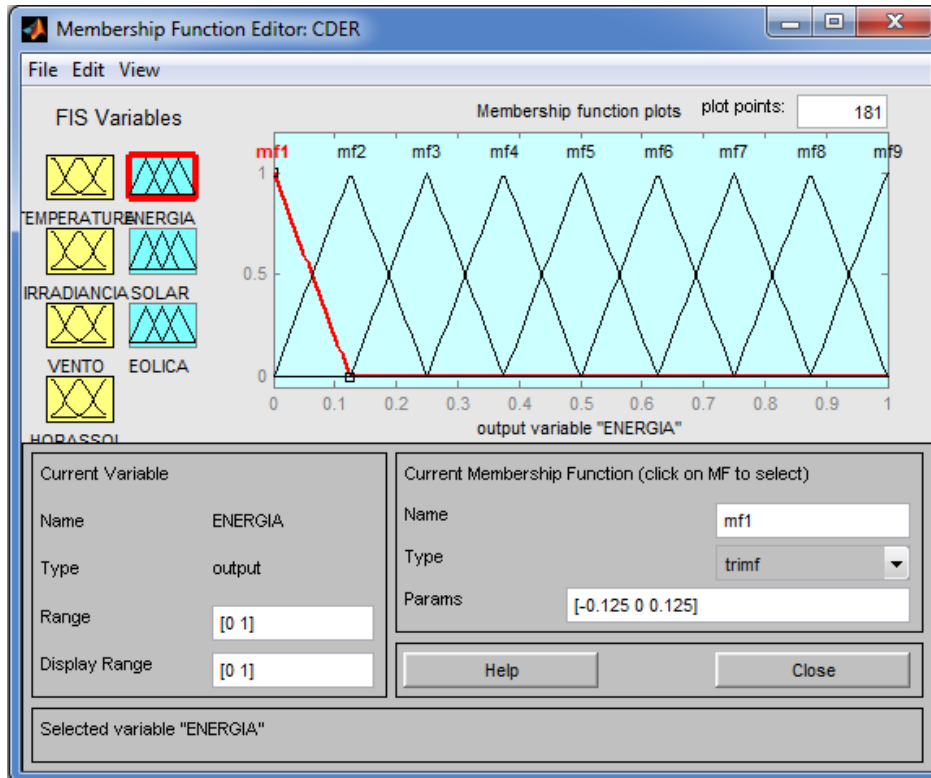


Figura 62 Descrição da variável difusa de entrada HORASSOL

### 4.3.3. VARIÁVEIS DE SAÍDA DO SISTEMA DIFUSO CDER

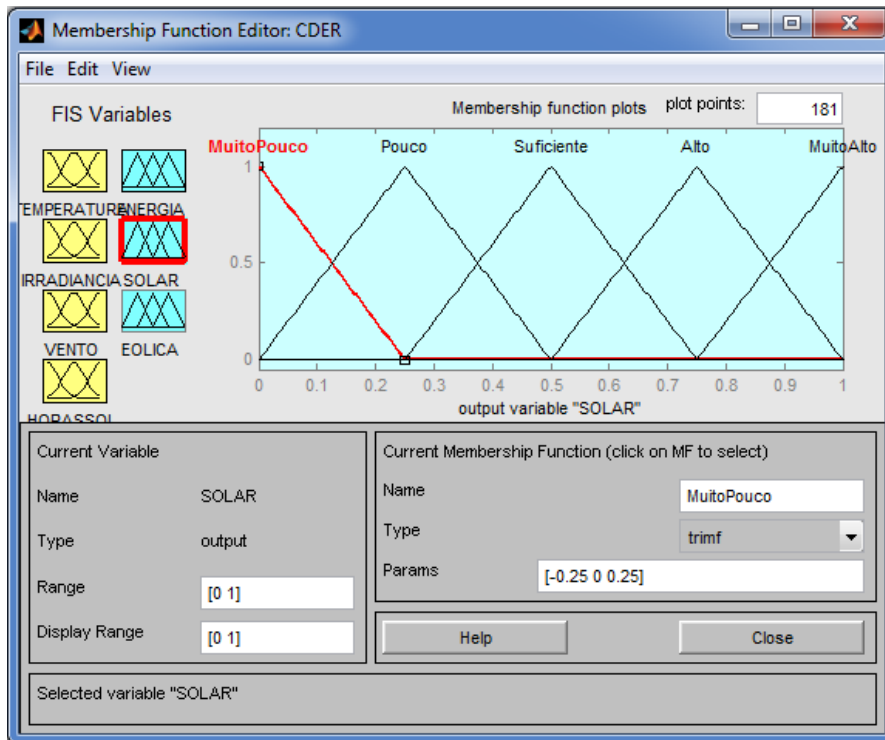
Na parte das variáveis de saída, as três saídas utilizadas, apresentam funções de pertinência triangulares (*TRIMF*). Em primeiro lugar surge a variável ENERGIA, na Figura 63, que tem o intuito de informar o utilizador sobre a quantidade de energia produzida, face à potência instalada, sendo que os valores de saída na *Interface* CDER são dados em percentagem.



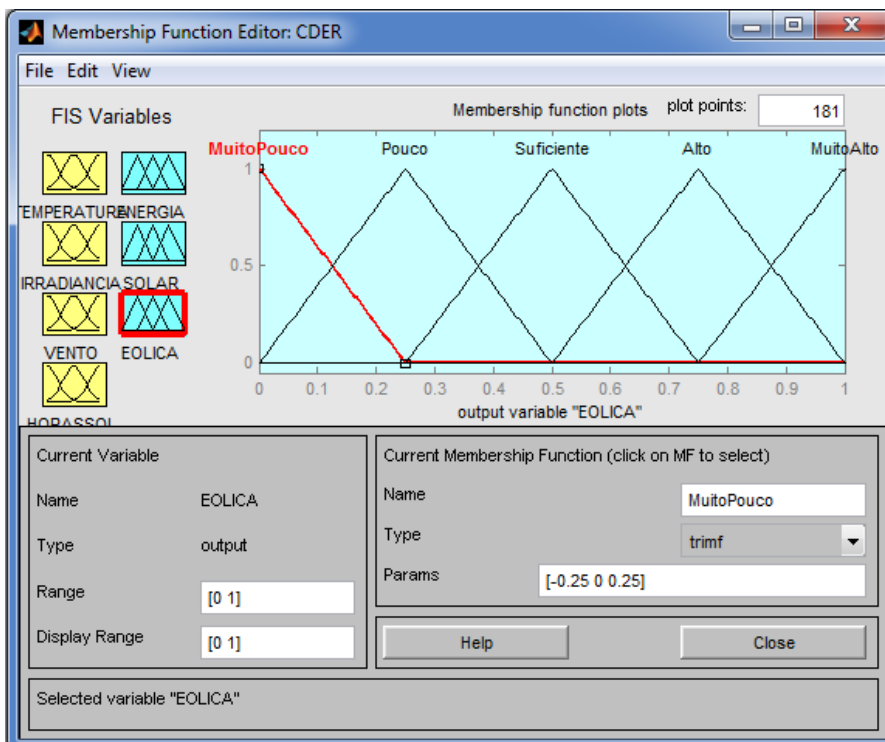
**Figura 63** Descrição da variável difusa de saída ENERGIA

Na Figura 64, está representada uma outra variável de saída, designada de SOLAR, que tem o objetivo de mostrar a percentagem de energia proveniente da fonte solar.

Finalmente, temos na Figura 65, a possibilidade de verificar, a contribuição eólica, face à energia total produzida pelo sistema desenvolvido, em percentagem. Quer para a variável de saída EOLICA, quer para a SOLAR, os valores linguísticos aplicados, foram: "MuitoPouco", "Pouco", "Suficiente", "Alto", "MuitoAlto". É de salientar que as gamas de valores atribuídas foram determinadas por observação dos valores característicos anuais relativamente à Temperatura, à Irradiação, à Velocidade do vento e também às horas de sol.



**Figura 64** Descrição da variável difusa de saída SOLAR



**Figura 65** Descrição da variável difusa de saída EOLICA

Partindo das bases apresentadas ao longo deste relatório, foram sendo exploradas várias opções quanto à realização do trabalho proposto. Desde logo, começando pelas variáveis

apresentadas na entrada do modelo desenvolvido ("TEMPERATURA", "IRRADIANCIA", "VENTO" e "HORASSOL"), que têm um papel fundamental no funcionamento do sistema, uma vez que são estas que “alimentam” a base de regras implementada, a qual as trabalha enquanto antecedentes de modo a que se obtenham consequentes válidos. A relação das variáveis entre si, assim como dos seus conjuntos difusos, é portanto fundamental para que se possam obter resultados satisfatórios relativamente às saídas estabelecidas no modelo.

#### 4.3.4. BASE DE REGRAS

A base de regras aplicada (Figura 66), possui inúmeras regras, nomeadamente 205 (Anexo C), por forma a devolver da forma mais aproximada resultados compatíveis com o que seria de esperar, a partir de um controlador convencional.

As regras são utilizadas, a partir da interligação das variáveis linguísticas, explorando a intersecção e a reunião dos conjuntos difusos, e tendo por base a influência que os elementos da natureza tem na produção de energia anteriormente descritos, em particular os elementos que contribuem para que seja produzida energia a partir das fontes solar e eólica. Os valores reais dos parâmetros referentes a estes elementos são obtidos a partir de bases de dados retiradas de uma estação meteorológica da Galiza, em Espanha, neste caso localizada na Cidade de Vigo (Porto de Vigo).

1. If (TEMPERATURA is MuitoBaixo) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is MuitoFraco) and (HORASSOL is MuitoEscasso) then (ENERGIA is mf1)(SOLAR is MuitoPouco)(EOLICA is MuitoPouco) (0.5)
  2. If (TEMPERATURA is Baixo) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is MuitoFraco) and (HORASSOL is MuitoEscasso) then (ENERGIA is mf1)(SOLAR is MuitoPouco)(EOLICA is MuitoPouco) (0.5)
  3. If (TEMPERATURA is Ameno) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is MuitoFraco) and (HORASSOL is MuitoEscasso) then (ENERGIA is mf2)(SOLAR is MuitoPouco)(EOLICA is MuitoPouco) (0.5)
  4. If (TEMPERATURA is Alto) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is MuitoFraco) and (HORASSOL is MuitoEscasso) then (ENERGIA is mf2)(SOLAR is MuitoPouco)(EOLICA is MuitoPouco) (0.5)
  5. If (TEMPERATURA is MuitoAlto) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is MuitoFraco) and (HORASSOL is MuitoEscasso) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is MuitoPouco) (0.5)
  6. If (TEMPERATURA is MuitoBaixo) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is Fraco) and (HORASSOL is Escasso) then (ENERGIA is mf1)(SOLAR is MuitoPouco)(EOLICA is Pouco) (0.5)
  7. If (TEMPERATURA is Baixo) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is Fraco) and (HORASSOL is Escasso) then (ENERGIA is mf2)(SOLAR is MuitoPouco)(EOLICA is Pouco) (0.5)
  8. If (TEMPERATURA is Ameno) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is Fraco) and (HORASSOL is Escasso) then (ENERGIA is mf2)(SOLAR is MuitoPouco)(EOLICA is Pouco) (0.5)
  9. If (TEMPERATURA is Alto) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is Fraco) and (HORASSOL is Escasso) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is Pouco) (0.5)
  10. If (TEMPERATURA is MuitoAlto) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is Fraco) and (HORASSOL is Escasso) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is Pouco) (0.5)
  11. If (TEMPERATURA is MuitoBaixo) and (IRRADIANCIA is Medio) and (VENTO is Normal) and (HORASSOL is Razoável) then (ENERGIA is mf2)(SOLAR is MuitoPouco)(EOLICA is Suficiente) (0.5)
  12. If (TEMPERATURA is Baixo) and (IRRADIANCIA is Medio) and (VENTO is Normal) and (HORASSOL is Razoável) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is Suficiente) (0.5)
  13. If (TEMPERATURA is Ameno) and (IRRADIANCIA is Medio) and (VENTO is Normal) and (HORASSOL is Razoável) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is Suficiente) (0.5)
  14. If (TEMPERATURA is Alto) and (IRRADIANCIA is Medio) and (VENTO is Normal) and (HORASSOL is Razoável) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is Suficiente) (0.5)
  15. If (TEMPERATURA is MuitoAlto) and (IRRADIANCIA is Medio) and (VENTO is Normal) and (HORASSOL is Razoável) then (ENERGIA is mf4)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is Suficiente) (0.5)
  16. If (TEMPERATURA is MuitoBaixo) and (IRRADIANCIA is Alto) and (VENTO is Forte) and (HORASSOL is Elevado) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is Alto) (0.5)
- ...
42. If (TEMPERATURA is MuitoAlto) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is MuitoForte) and (HORASSOL is MuitoElevado) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is MuitoAlto) (0.5)
  43. If (TEMPERATURA is MuitoAlto) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is MuitoForte) and (HORASSOL is MuitoElevado) then (ENERGIA is mf5)(SOLAR is Suficiente)(EOLICA is MuitoAlto) (0.5)
  44. If (TEMPERATURA is MuitoAlto) and (IRRADIANCIA is Medio) and (VENTO is MuitoForte) and (HORASSOL is MuitoElevado) then (ENERGIA is mf7)(SOLAR is Alto)(EOLICA is MuitoAlto) (0.5)
  45. If (TEMPERATURA is MuitoAlto) and (IRRADIANCIA is Alto) and (VENTO is MuitoForte) and (HORASSOL is MuitoElevado) then (ENERGIA is mf8)(SOLAR is Alto)(EOLICA is MuitoAlto) (1)
  46. If (TEMPERATURA is MuitoBaixo) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is Fraco) and (HORASSOL is MuitoEscasso) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is Pouco) (1)
  47. If (TEMPERATURA is MuitoBaixo) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is Normal) and (HORASSOL is MuitoEscasso) then (ENERGIA is mf4)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is Suficiente) (1)
  48. If (TEMPERATURA is MuitoBaixo) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is Forte) and (HORASSOL is MuitoEscasso) then (ENERGIA is mf6)(SOLAR is Suficiente)(EOLICA is Alto) (1)
  49. If (TEMPERATURA is MuitoBaixo) and (IRRADIANCIA is MuitoFraco) and (VENTO is MuitoForte) and (HORASSOL is MuitoEscasso) then (ENERGIA is mf8)(SOLAR is Alto)(EOLICA is MuitoAlto) (0.5)
  50. If (TEMPERATURA is Baixo) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is MuitoFraco) and (HORASSOL is Escasso) then (ENERGIA is mf2)(SOLAR is MuitoPouco)(EOLICA is MuitoPouco) (1)
  51. If (TEMPERATURA is Baixo) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is Normal) and (HORASSOL is Escasso) then (ENERGIA is mf5)(SOLAR is Suficiente)(EOLICA is Alto) (1)
  52. If (TEMPERATURA is Baixo) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is Forte) and (HORASSOL is Escasso) then (ENERGIA is mf6)(SOLAR is Suficiente)(EOLICA is Alto) (1)
  53. If (TEMPERATURA is Baixo) and (IRRADIANCIA is Fraco) and (VENTO is MuitoForte) and (HORASSOL is Escasso) then (ENERGIA is mf8)(SOLAR is Alto)(EOLICA is MuitoAlto) (1)
  54. If (TEMPERATURA is Ameno) and (IRRADIANCIA is Medio) and (VENTO is MuitoFraco) and (HORASSOL is Razoável) then (ENERGIA is mf3)(SOLAR is Pouco)(EOLICA is MuitoPouco) (1)

Figura 66 Regras utilizadas no controlador difuso CDER

Para aceder aos dados reais desta estação meteorológica, foi desenvolvido um programa, que será explicado na subsecção seguinte, que permite aceder aos parâmetros meteorológicos reais, sendo eles as entradas do sistema, passando posteriormente a serem manipulados pelo sistema de inferência difuso, obtendo-se assim uma determinada saída.

#### 4.3.5. INTERFACE CDER

A Figura 67, ilustra o *interface* que permite ao utilizador a partir dos dados físicos do meio ambiente, perceber se irá conseguir obter produção de energia, proveniente de fontes renováveis, e se sim, dentro dessa energia qual a parte respeitante às energias solar e eólica.

Facilmente se compreende a função de cada botão presente nesta *interface*, na qual é possível a partir da seleção escolhida pelo utilizador, atualizar os dados para análise provenientes da estação meteorológica, prever a energia produzida para as condições atmosféricas fornecidas ao sistema, assim como as contribuições individuais das energias solar e eólica.

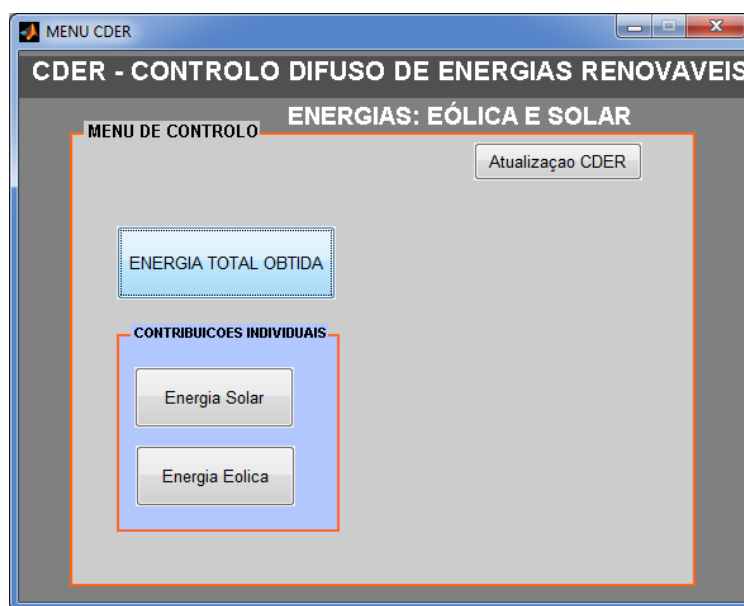
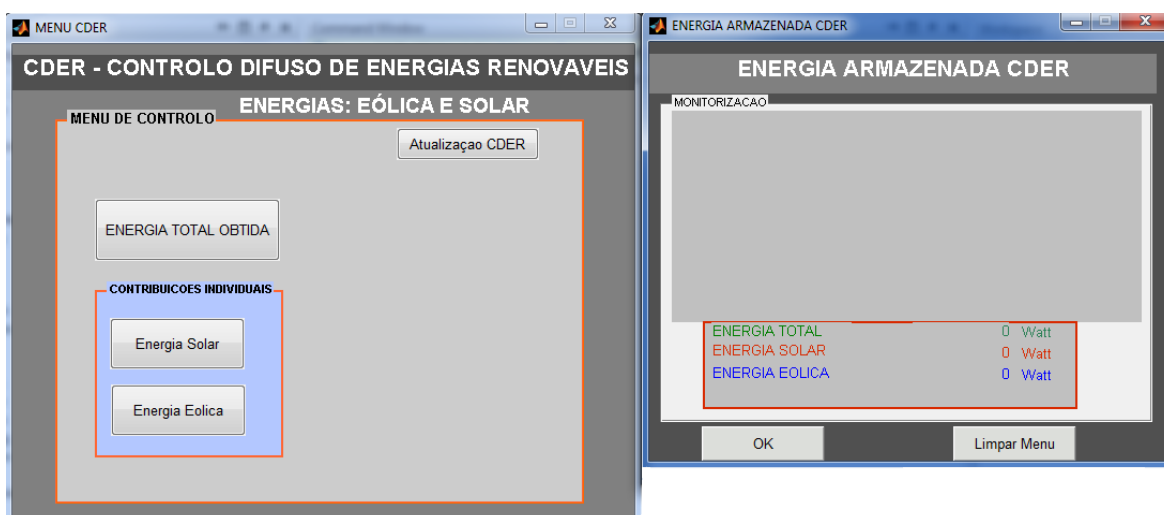


Figura 67 Interface CDER

Partindo dos fundamentos apresentados ao longo deste relatório, quer relacionados com a lógica difusa quer com questões referentes às fontes de energia solar e eólica, foram sendo exploradas várias opções quanto à realização do trabalho proposto.

O controlador desenvolvido terá de possuir a capacidade de possibilitar a monitorização (Figura 68), dos parâmetros essenciais em causa:



**Figura 68 Monitorização do controlador CDER**

No que respeita à saída produzida pelo controlador CDER, a Figura 69, demonstra na totalidade os elementos que são colocados à disposição do utilizador para que possa monitorizar o que está a acontecer no sistema.

É apresentada uma imagem elucidativa da percentagem de energia que pode ser produzida para as condições de entrada. Também são dados a conhecer os valores estimados da energia total produzida e também das contribuições, solar e eólica que integram o sistema desenvolvido.



Figura 69 Monitorização de parâmetros

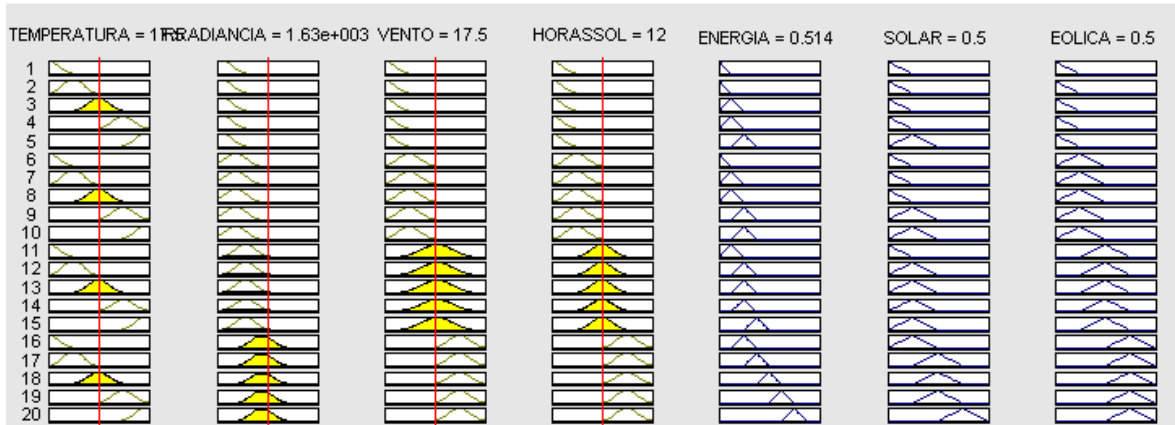
#### 4.4. DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR CDER

Num momento inicial, foi desenvolvido um sistema com uma base de regras que assentava em 15 regras. Com um sistema tão simples, tal como seria de esperar, não foram obtidos os resultados ideais, pelo que foram sendo acrescentadas novas regras e mediante a análise dos resultados, o controlo foi sendo sintonizado de modo a que se aproximasse o mais possível de um sistema real (Figura 70).

Mediante a maior ou menor importância (grau de pertinência) de um fator para uma determinada situação, leva a que a sua relevância no sistema seja alterada, ou seja, a influência de um conjunto difuso de uma determinada variável, pode ser mais importante numa determinada situação do que numa outra, se não vejamos:

Se estivermos num pleno dia de verão, logo com muitas horas de sol e por exemplo com uma irradiação solar muito alta mas com vento muito fraco, então não iremos conseguir obter um proveito da energia eólica tão elevado como conseguiremos através da energia solar.

Por outro lado, se o dia for ameno no que toca à temperatura, com um vento suave e uma irradiação solar média, teremos à partida um rendimento eólico e solar razoável, que resultará na obtenção de um nível de energia já num patamar médio para o sistema dimensionado.



**Figura 70 Base de regras implementadas**

É com base em premissas como estas que foi sendo desenvolvido o raciocínio difuso aplicado neste projeto. Cada premissa tem um grau de importância próprio que pode ser mais alto ou mais baixo comparativamente às outras premissas, variando num fator entre 0 e 1. De facto para situações extremas (muito/pouco sol ou vento), revelou-se de extrema importância a definição clara destas situações climatéricas mais extremas.

Importa ainda referir que ao nível solar, o sistema foi definido como estando a funcionar com o máximo rendimento possível, ou seja, o painel solar utilizado consegue usufruir o máximo possível da irradiação solar. Ao nível eólico, também foi aplicado de forma análoga este princípio de máximo rendimento, em que o gerador eólico consegue aproveitar ao máximo a velocidade do vento, estando para isso sempre posicionado na posição mais favorável.

Posto este modo de relacionar os factos, foi desenvolvido o modelo de controlo difuso com base em energias renováveis, solar e eólica - **CDER**.

Inicialmente, como já foi referido no início deste capítulo, são recebidos os dados relativos às condições atmosféricas, nomeadamente no caso estudado, dados diários de fenómenos naturais tais como a temperatura média, a irradiação solar global, as horas de sol e a velocidade do vento. Estes dados são adquiridos via *internet* na estação meteorológica

“Meteogalicia”, a qual disponibiliza os dados necessários ao projeto em causa em formato “xml”, assim como em folha de cálculo.

É a partir dos ficheiros em formato "xml" que o sistema adquire os valores para as entradas do controlador difuso. De seguida está ilustrado um excerto do ficheiro .xml.

```
<?xml version="1.0" encoding="iso-8859-1"
standalone="yes"?>
<Estacion ID="14001" Nome="Porto de Vigo">
  <Codigos_Validacion>
    <Codigo ID="0" Descricion="Dato sen
validar"/>
    <Codigo ID="1" Descricion="Dato
válido orixinal"/>
    <Codigo ID="2" Descricion="Dato
sospeitoso"/>
    <Codigo ID="3" Descricion="Dato
erróneo"/>
    <Codigo ID="4" Descricion="Dato
acumulado"/>
    <Codigo ID="5" Descricion="Dato
válido interpolado"/>
    <Codigo ID="9" Descricion="Dato non
rexistrado"/>
  </Codigos_Validacion>
  <Observacions>
    <Observacion ID="1" Descricion="O
valor -9999 indica dato non rexistrado."/>
  </Observacions>
  <Valores Data="01/08/2014">
    <Medida ID="81" Variable="Velocidade
do Vento" Unidades="m/s" Valor="3,84"
Codigo_validacion="1"/>
    <Medida ID="83" Variable="Temperatura
media" Unidades="°C" Valor="18,45"
Codigo_validacion="1"/>
    <Medida ID="84" Variable="Temperatura
máxima" Unidades="°C" Valor="20,12"
Codigo_validacion="1"/>
    <Medida ID="85" Variable="Temperatura
mínima" Unidades="°C" Valor="16,69"
Codigo_validacion="1"/>
    <Medida ID="10006" Variable="Horas de
Sol" Unidades="h" Valor="4,67"
Codigo_validacion="1"/>
    <Medida ID="10013"
Variable="Irradiación Global Diaria"
Unidades="10kJ/(m2.día)" Valor="1599"
Codigo_validacion="1"/>
```

```

    <Medida ID="10106"
    Variable="Insolación" Unidades="%"
    Valor="32,6" Codigo_validacion="1"/>
  </Valores>

```

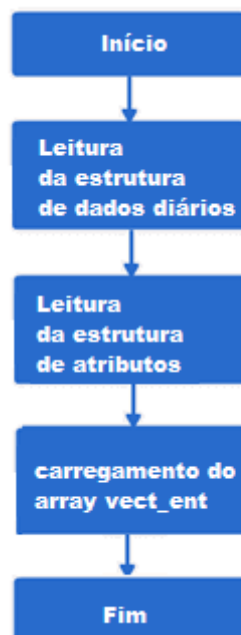
Para carregar os datos meteorológicos necesarios para o sistema difuso, foi necessário elaborar um programa (m-file) em ambiente MATLAB, que se apresenta de seguida:

```

[tree treeName] = xml_read ('dados_dia.xml');
for i=1:1:length(tree.Valores.Medida);
if (i==2);%Temperatura Média do Ar
    variavel(1).nome =
tree.Valores.Medida(i).ATTRIBUTE.Variable;
    variavel(1).valor=
tree.Valores.Medida(i).ATTRIBUTE.Valor;
    vect_ent(1) = variavel(1).valor;
    variavel(1).unidade =
tree.Valores.Medida(i).ATTRIBUTE.Unidades;
end

```

A funcionalidade deste m-file consiste em “varrer” os dados da estrutura do ficheiro em formato "xml" e guardar num vetor a informação necessária às variáveis de entrada do sistema, tal como se ilustra na Figura 71.



**Figura 71 Fluxograma da aquisição de dados meteorológicos**

Num outro m-file, está a base de interação com o utilizador, na qual é feita a interligação de todos os componentes constituintes do controlador final. Por exemplo, sempre que o utilizador quer "Atualização CDER", no fundo está a recorrer ao m-file que percorre a

estrutura do ficheiro em formato "xml". Mas se clicar em "Energia Total Obtida", (Figura 67) está a recorrer a um outro m-file, que tem a finalidade de mostrar a saída do controlador difuso desenvolvido. Este m-file permite a visualização de uma nova janela, na qual está representada uma barra de energia, onde é indicada, mediante os dados de entrada, a estimação em percentagem da quantidade de energia que está a ser produzida (Figura 68). Debaixo desta barra é ainda dada a informação dos valores das contribuições das energias solar e eólica (em Watts), para essa energia produzida. Assim, temos estas três saídas independentes, em que como iremos observar nas tabelas de análise de resultados, o valor da energia nem sempre coincide exatamente com a soma das componentes solar e eólica, resultando no entanto, em valores próximos. Por exemplo, para um nível de energia de 100% mas com sol a 100% e vento a 50%, para valores nominais de potência solar e eólica semelhantes, a energia total produzida deveria de rondar os 75% da sua capacidade (sendo 50% da sua capacidade devida à parte solar e a restante à eólica).

O encadeamento de todas estas etapas para a realização do trabalho proposto, seguiu a lógica estipulada através do seguinte diagrama, ilustrado na Figura 72:

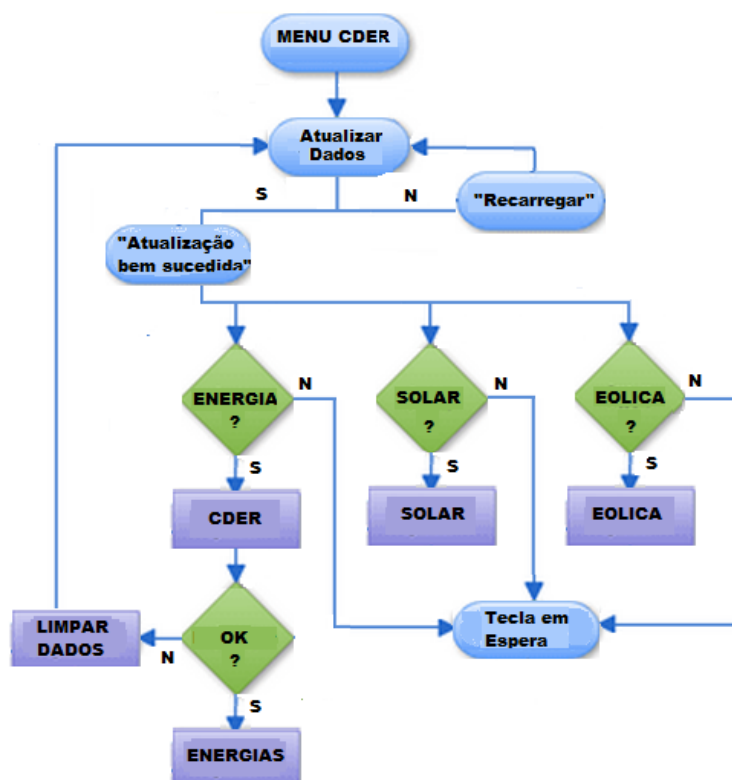


Figura 72 Fluxograma do encadeamento de programas aplicados

#### 4.5. ANÁLISE MATEMÁTICA DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICO E EÓLICO

Para que fosse possível a análise dos resultados, foram estabelecidos em folha de cálculo os parâmetros essenciais para explicitar os valores reais esperados num sistema solar-fotovoltaico e eólico a partir dos dados fornecidos pela estação meteorológica.

Foi necessário converter os valores meteorológicos referentes aos elementos solares e eólicos em valores energéticos, por forma a poder ser feita uma estimativa da energia produzida pelo sistema e desta forma, poder partir para uma análise mais pormenorizada de comparação com o modelo difuso aplicado.

##### 4.5.1. PAINEL FOTOVOLTAICO

Foram pesquisados vários fabricantes de módulos fotovoltaicos e de turbinas eólicas de pequena potência, tendo-se estabelecido que iria ser utilizada uma gama de equipamentos que tivesse uma capacidade máxima igual, de modo a poder comparar mais facilmente a própria produção de energia mediante os recursos naturais em causa.

Ao nível solar, a escolha recaiu sobre um modelo do fabricante Kyocera (do Japão) que possui as seguintes características, descritas genericamente na Tabela 4, e mais em pormenor no Anexo D:

Tabela 4 Características do painel fotovoltaico [kyocera, 2014]

<b>Potência máxima</b>	160 W
<b>Desvio de potência</b>	-1%~+3%
<b>Tensão máxima do sistema</b>	17,99 V
<b>Corrente máxima do sistema</b>	9A
<b>Tensão de circuito aberto</b>	22,19 V
<b>Short-Circuit Current:</b>	9,7 A
<b>Tensão máxima do sistema:</b>	1000 V
<b>Dimensões:</b>	860 mm x 1396 mm x 35 mm
<b>Peso</b>	~16,5 Kg
<b>Condições de teste padrão:</b>	1000 W/m <sup>2</sup> ; AM1,5; 25°C

Portanto o sistema desenvolvido tem o pressuposto de um máximo de produção de 160 W com origem em energia solar. Os dimensionamentos do sistema real esperado foram então realizados tendo em conta as características associadas ao módulo em questão (Figura 73).



**Figura 73 Módulo Kyocera [Kyocera, 2014]**

A partir destes valores tabelados foi possível refinar o sistema desenvolvido e perceber ainda melhor a influência de determinados parâmetros no sistema.

A equação (4.1) permite determinar a energia que é produzida idealmente pelo módulo fotovoltaico durante um dia, em função da radiação solar incidente e da temperatura do módulo:

$$E_{ideal}^{dia} = K_T \times H_S \times P_{max} \quad (4.1)$$

em que:

$K_T$  representa um fator de correção de temperatura

$H_S$  caracteriza as horas de sol ao longo do dia

$P_{max}$  representa a potência que vem designada nas características fornecidas pelo fabricante.

Quanto à constante de temperatura, esta está indicada na equação (4.2), onde  $T$  expressa a temperatura média ao longo do dia;

$$K_T = 1 - 0,005 \times (T - 25^\circ\text{C}) \quad (4.2)$$

As horas de sol ( $H_S$ ), são determinadas pela equação (4.3):

$$H_S = \frac{E \text{ (Wh/m}^2\text{)}}{G^r \text{ (W/m}^2\text{)}} \quad (4.3)$$

onde,  $E$  representa o valor da energia da radiação global incidente e  $G^r$  o valor da radiação solar incidente nas condições de referência (1000 W/m<sup>2</sup> :  $G^r$ )

As condições que serão consideradas ideais para o desempenho do painel solar, serão uma inclinação ótima por forma a captar o máximo de radiação solar e conseqüentemente o máximo de energia, assim como garantir a ausência de obstáculos que possam provocar sombras ou até mesmo ofuscar totalmente a radiação solar.

No entanto, na prática para uma melhor aproximação ao valor da energia efetivamente fornecida pelo gerador há que ter em conta ainda o índice de desempenho ( $PR$ ) do painel fotovoltaico, que se deve sobretudo ao rendimento do inversor e das perdas de energia ao nível das cablagens [CARNEIRO, 2009]:

$$E_{real}^{dia} = PR \times (K_T \times H_S \times P_{max}^r) \quad (4.4)$$

#### 4.5.2. SISTEMA EÓLICO

Quanto ao gerador eólico, também houve a necessidade de proceder ao cálculo dos parâmetros necessários para se obter o melhor desempenho deste elemento integrante do projeto desenvolvido. Na Tabela 5, estão descritas as principais características técnicas fornecidas pelo fabricante da turbina eólica (Air Breeze) (Figura 74) utilizada neste trabalho, e mais pormenorizadas no Anexo D.

Tabela 5 Características do gerador eólico [Airbreeze, 2014]

<b>Peso:</b>	6 Kg
<b>Diâmetro do Rotor:</b>	1,17 m
<b>Velocidade do vento no arranque:</b>	2,7 m/s
<b>Produção (kWh/mês):</b>	38 KWh/mês a uma velocidade média do vento de 5,4 m/s
<b>Velocidade Máxima do Vento:</b>	49,5 m/s
<b>Potência Nominal:</b>	160 W a 12,5 m/s
<b>Certificação:</b>	CSA (certificado1954979)



Figura 74 Gerador eólico Air Breeze [Airbreeze, 2014]

A densidade do ar seco ( $\rho$ ) pode ser calculada usando a lei dos gases ideais, expressa como função da temperatura e da pressão, descrita da seguinte forma:

$$\rho = \frac{p}{R_{ar\ seco} \times T} \quad (4.5)$$

sendo a pressão absoluta dada por:

$$p = 101325Pa \quad (4.6)$$

a temperatura absoluta, descrita por:

$$T = (273,15 + 20^\circ\text{C})K \quad (4.7)$$

e a constante específica para o ar seco a seguinte [Spera, 1994]:

$$R_{ar\ seco} = 287,058J.Kg^{-1}.K^{-1} \quad (4.8)$$

Ora, como já foi referenciado, no capítulo 2, ao nível eólico podemos saber a potência gerada através de uma turbina eólica recorrendo à equação:

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times A \times v^3, \text{ sendo que } A = \frac{\pi \times d^2}{4}$$

Mas, para uma análise mais realista, atentemos à equação (4.9):

$$P = \frac{1}{2} \times rend. \times C_p \times \rho \times A \times v^3 \quad (4.9)$$

onde está incluída a eficiência do aero-gerador, isto é, o rendimento considerando as perdas no conjunto das transmissões mecânicas e as perdas no gerador. O termo  $C_p$  representa o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor, cujo valor máximo é de 0,593, segundo os estudos desenvolvidos por Albert Betz. Face a estes factos, não existem geradores eólicos com eficiência de 100% no que respeita ao aproveitamento da energia cinética do vento, pois existem perdas. É comum, que apenas sejam efetivamente entregues entre 25% a 45% da energia do vento como energia elétrica útil, embora possa ter valores inferiores (Tabela 6) :

**Tabela 6 Características de geradores eólicos [Wind, 2015]**

Type	Speed	Torque	$C_p$	Solidity (%)	Use
<b>Horizontal Axis</b>					
Multi blade	Low	High	0.25 - 0.4	50 - 80	Mechanical Power
Three-bladed aerofoil	High	Low	up to 0.45	Less than 5	Electricity Production
<b>Vertical Axis</b>					
Panemone	Low	Medium	less than 0.1	50	Mechanical Power
Darrieus	Moderate	Very low	0.25 - 0.35	10 - 20	Electricity Production

Ainda dentro desta temática, a partir do diâmetro do rotor e das potências que se atingem, são feitas distinções entre geradores, sendo realizada uma distinção entre micro, pequenos, médios e grandes geradores eólicos, segundo os valores apresentados na Tabela 7:

**Tabela 7 Nomenclatura do geradores eólicos [Spera, 1994], [Gipe, 1999]**

Escala	Diâmetro do Rotor	Potência Nominal
Micro	Inferior a 3 metros	De 50 W a 2 kW
Pequena	De 3 metros a 12 metros	De 2 kW a 40 kW
Média	De 12 metros a 45 metros	De 40 kW a 99 kW
Grande	Superior a 46 metros	Superior a 1.0 MW

Tal como podemos constatar através da classificação apresentada na Tabela 7, o gerador eólico selecionado encontra-se na gama das micro turbinas eólicas.

O painel solar selecionado também apresenta uma reduzida potência nominal, pelo que estes equipamentos terão sentido de existir em aplicações que requeiram um baixo nível de energia, como o carregamento de baterias, a alimentação de uma instalação elétrica com baixa potência como por exemplo, para alimentar algumas lâmpadas, ou pequenos equipamentos eletrónicos instalados num local isolado em que não exista a possibilidade de ligação a uma rede elétrica.

A junção destes dois elementos naturais (sol e vento) permite a criação de um pequeno sistema de produção de energia, com base em recursos renováveis, o qual permite determinar um modelo de controlo para simular a produção de energia, a partir de dados relativos a esses mesmos recursos.

Uma vez que os dados são respeitantes a elementos que pela sua natureza são imprevisíveis, permite associar este aspeto ao que já foi demonstrado no capítulo 3 (Lógica Difusa), e concluir que o controlo por inferência difusa deste tipo de sistemas será bastante vantajoso.

#### **4.6. ANÁLISE DE RESULTADOS**

A partir das ilustrações gráficas a seguir apresentadas, irá ser feita uma análise dos resultados obtidos através do uso do controlador difuso desenvolvido e validados por comparação com os dados reais esperados. Conforme já anteriormente explanado, os dados reais foram obtidos recorrendo às expressões matemáticas que modelam o painel fotovoltaico e o aerogerador, bem como às características fornecidas pelos fabricantes de ambos os módulos.

Os resultados são relativos a dados atmosféricos adquiridos durante uma semana do mês de agosto de 2014 (do dia 14 ao dia 22), e outra relativa ao mês de novembro (do dia 1 ao dia 7). A escolha desta duas semanas prende-se com o facto de na primeira predominar o sol e na segunda o vento. Desta forma é possível analisar o funcionamento do controlador para situações atmosféricas específicas. Por fim foi realizado o estudo para o mês completo de agosto, na qual existem as duas situações anteriormente descritas e em simultâneo.

Para uma melhor perceção do valor do desvio relativamente ao que seria de esperar, para cada um dos casos, foi calculado o erro através da expressão (4.10), a qual corresponde ao erro quadrático que define a diferença quadrática entre o valor real e o valor difuso obtidos ao longo dos dias analisados,  $n$ .

$$e = \frac{\sum_a^n (Valor_{real} - Valor_{Difuso})^2}{n} \quad (4.10)$$

Como é perceptível na Figura 75, as duas curvas relativas aos dados obtidos para o painel fotovoltaico (presentes na Tabela 8), têm pontos comuns na sua forma, embora com um ligeiro desencontro por volta do dia 18, mas com um erro de apenas 1,72%.

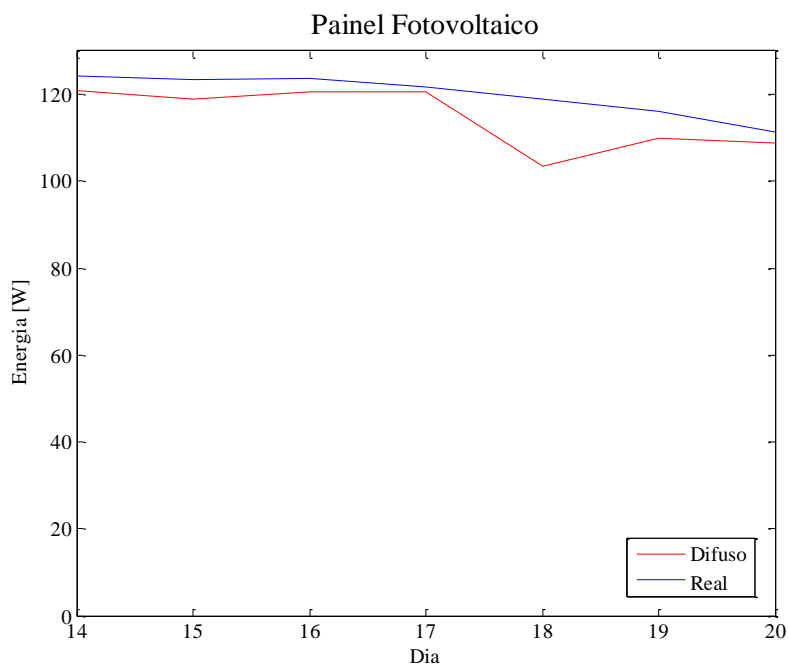
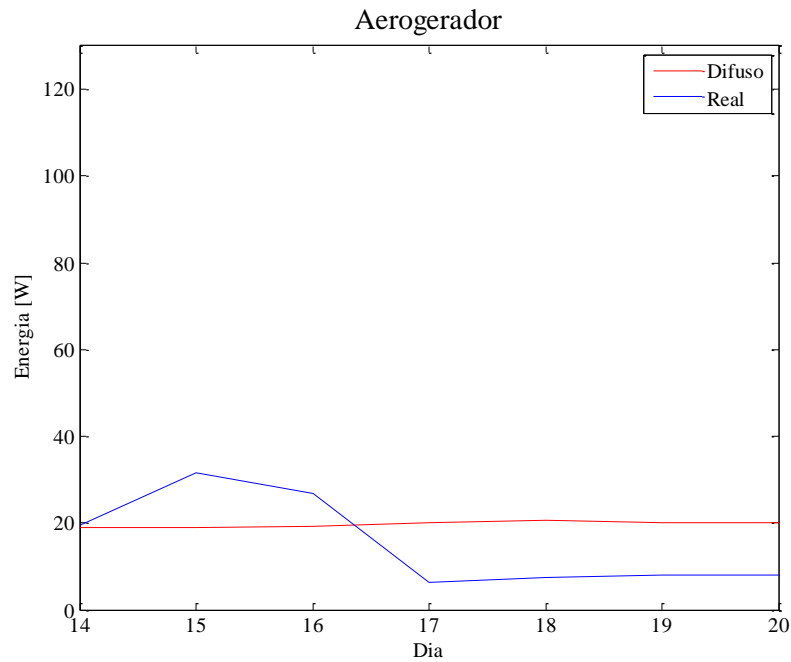


Figura 75 Energia devida ao painel fotovoltaico numa semana de agosto

Tabela 8 Variáveis utilizadas para o painel fotovoltaico numa semana de agosto e correspondentes valores obtidos

Base de Dados					Resultados Obtidos	
Data	Temperatura Média (°C)	Horas de Sol (h)	Irradiação Solar (10kJ/(m <sup>2</sup> . dia))	Velocidade do Vento (m/s)	Real (W)	Difuso (W)
14	19,3	12,6	2717	4,19	124,21	120,74
15	19,8	12,7	2707	4,92	123,44	119,00
16	21,7	12,7	2737	4,67	123,66	120,55
17	22,1	12,6	2699	2,89	121,7	120,50
18	20,9	12,3	2621	3,03	118,88	103,46
19	20,1	12	2548	3,13	116,03	109,91
20	18,2	12,3	2423	3,12	111,36	108,69

Na Figura 76, estão representadas as curvas obtidas para o aerogerador para a mesma semana do painel fotovoltaico:



**Figura 76 Energia devida ao aerogerador numa semana de agosto**

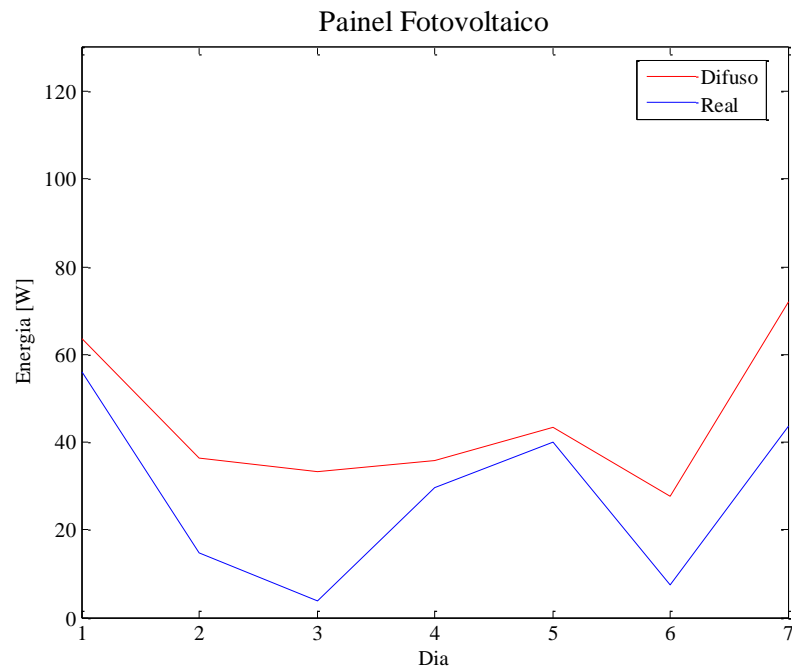
Estas curvas basearam-se nos dados que constam na Tabela 9:

**Tabela 9 Variáveis utilizadas para o aerogerador numa semana de agosto e correspondentes valores obtidos**

Base de Dados					Resultados Obtidos	
Data	Temperatura Média (°C)	Horas de Sol (h)	Irradiação Solar (10kJ/(m <sup>2</sup> . día))	Velocidade do Vento (m/s)	Real (W)	Difuso (W)
14	19,3	12,6	2717	4,19	19,54	18,96
15	19,8	12,7	2707	4,92	31,59	18,91
16	21,7	12,7	2737	4,67	26,83	19,16
17	22,1	12,6	2699	2,89	6,35	20,20
18	20,9	12,3	2621	3,03	7,35	20,77
19	20,1	12	2548	3,13	8,12	19,96
20	18,2	12,3	2423	3,12	8,09	19,97

O erro quadrático obtido foi de 0,048%, relativamente ao gerador eólico durante o mês de agosto. Também este nos revela a aproximação dos valores do controlador difuso aos valores reais esperados.

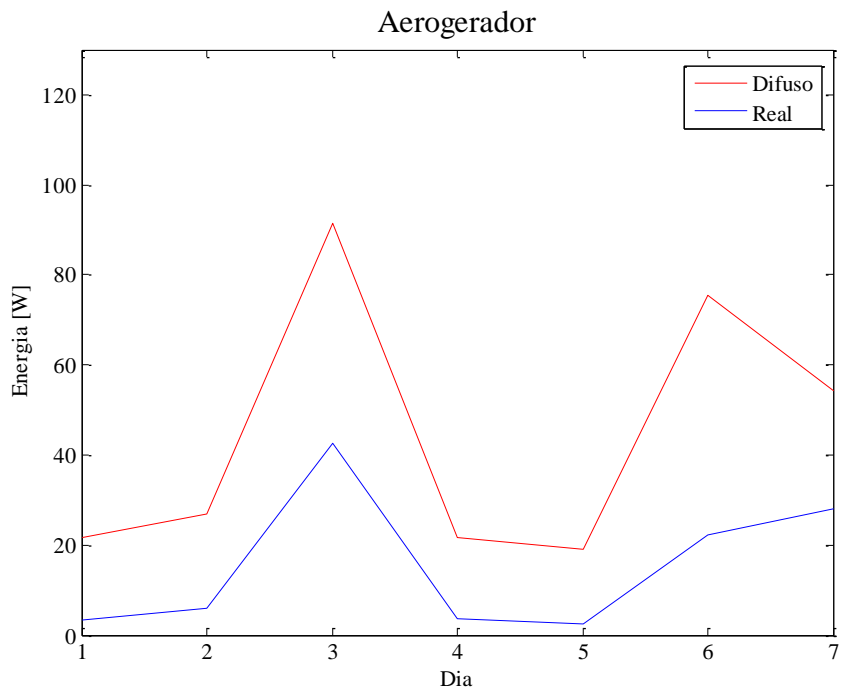
Para uma segunda análise foram realizados testes para estudo do comportamento do sistema perante condições climáticas diferentes das anteriormente descritas. Como tal, foram adquiridos os dados referentes à primeira semana de novembro (Tabela 10 e Tabela 11), por forma a ser possível obter resultados quer para o painel fotovoltaico (Figura 77), quer para o aerogerador (Figura 78), numa semana com pouco sol e muito vento.



**Figura 77 Energia devida ao painel fotovoltaico numa semana de novembro**

**Tabela 10** Variáveis utilizadas para o painel fotovoltaico numa semana de novembro e correspondentes valores obtidos

Base de Dados					Resultados Obtidos	
Data	Temperatura Média (°C)	Horas de Sol (h)	Irradiação Solar (10kJ/(m <sup>2</sup> . dia))	Velocidade do Vento (m/s)	Real (W)	Difuso (W)
1	17,41	7,75	1214	7,99	56,01	63,46
2	15,63	1,38	315	9,86	14,66	36,3
3	15,68	0,1	84	18,86	3,9	33,38
4	11,63	3,45	624	8,28	29,59	35,75
5	12,34	7,73	847	7,88	40,04	43,36
6	14,71	0,2	158	15,19	7,38	27,74
7	10,28	2,22	942	16,45	43,67	71,94



**Figura 78** Energia devida ao aerogerador numa semana de novembro

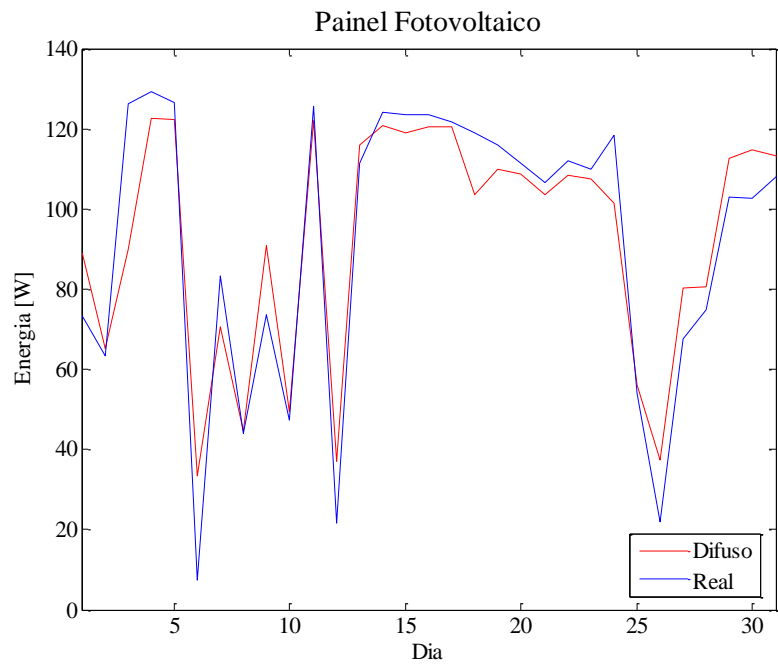
**Tabela 11 Variáveis utilizadas para o aerogerador numa semana de novembro e correspondentes valores obtidos**

Base de Dados					Resultados Obtidos	
Data	Temperatura Média (°C)	Horas de Sol (h)	Irradiação Solar (10kJ/(m <sup>2</sup> .día))	Velocidade do Vento (m/s)	Real (W)	Difuso (W)
1	17,41	7,75	1214	7,99	3,21	21,74
2	15,63	1,38	315	9,86	6,08	26,91
3	15,68	0,1	84	18,86	42,5	91,57
4	11,63	3,45	624	8,28	3,65	21,62
5	12,34	7,73	847	7,88	2,5	18,99
6	14,71	0,2	158	15,19	22,29	75,34
7	10,28	2,22	942	16,45	28,15	54,18

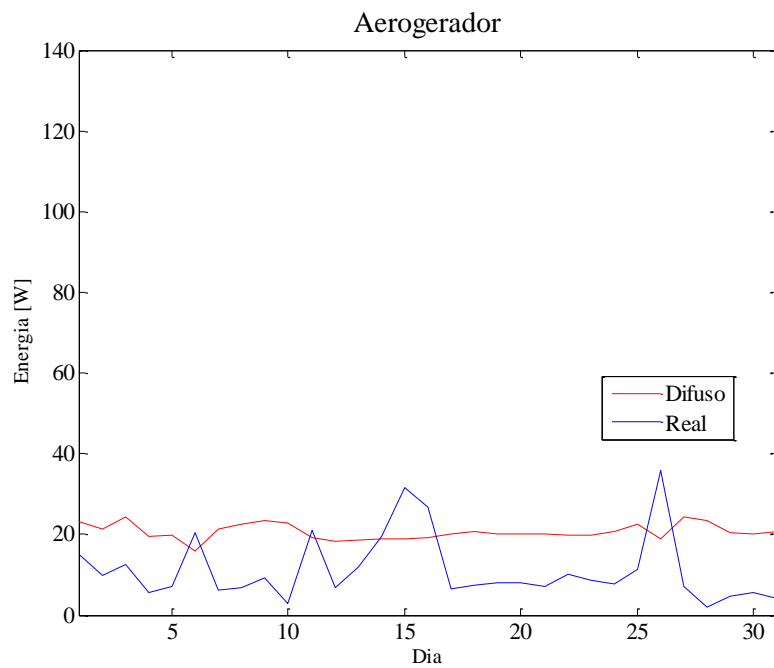
Nestes casos, o erro foi maior do que no mês de agosto, tendo o erro do painel fotovoltaico atingido o valor de 7,93% e do aerogerador 49,05%. Estes valores deixam transparecer a imprevisibilidade do vento, que nesta região (Vigo) tal como no Porto, revela momentos de fortes rajadas do vento no decorrer de 24 horas. Nestas situações o controlador difuso apresenta ainda alguma vulnerabilidade na resposta às condições do sistema, revelando a necessidade de alguma melhoria no controlador.

Finalmente, o controlador difuso foi aplicado para um mês completo, neste caso o mês de agosto de 2014.

A análise tal como nos casos anteriores, foi realizada quer para o painel fotovoltaico (Figura 79), quer para o aerogerador (Figura 80).



**Figura 79** Energia devida ao painel fotovoltaico durante o mês de agosto



**Figura 80** Energia devida ao aerogerador durante o mês de agosto

Na Tabela 12 podemos comparar os valores reais esperados com os obtidos através da simulação difusa, para ambos os módulos:

**Tabela 12 Valores obtidos para o painel fotovoltaico e para o aerogerador e correspondentes valores reais, para o mês de agosto**

<b>2014</b>	<b>Valores Solares (W)</b>		<b>Valores Eólicos (W)</b>	
	<b>Dias do mês de agosto</b>	<b>Real</b>	<b>Difuso</b>	<b>Real</b>
1	73,38	88,99	15,08	23,13
2	63,42	65,04	9,73	21,35
3	126,22	90,03	12,63	24,36
4	129,33	122,58	5,72	19,56
5	126,66	122,27	7,02	19,76
6	7,38	33,38	20,29	15,80
7	83,37	70,48	6,18	21,42
8	43,97	44,50	6,78	22,57
9	73,57	90,92	9,22	23,55
10	47,38	49,52	2,90	22,98
11	125,60	121,98	21,08	19,31
12	21,75	37,18	6,69	18,30
13	111,56	115,91	11,92	18,74
14	124,21	120,74	19,54	18,96
15	123,44	119,00	31,59	18,91
16	123,66	120,55	26,83	19,16
17	121,70	120,50	6,35	20,20
18	118,88	103,46	7,35	20,77
19	116,03	109,91	8,12	19,96
20	111,36	108,69	8,09	19,97
21	106,60	103,56	7,01	20,12
22	111,93	108,34	10,17	19,84
23	109,94	107,57	8,64	19,91
24	118,29	101,44	7,63	20,77
25	53,98	56,22	11,37	22,63
26	21,98	37,30	35,86	18,78
27	67,45	80,15	7,19	24,42
28	74,69	80,73	1,96	23,40
29	102,86	112,67	4,76	20,47
30	102,60	114,61	5,49	20,24
31	108,10	113,18	4,03	20,61

Neste caso o erro quadrático obtido foi de 0,72% devido ao painel fotovoltaico e de 18,11% para o gerador eólico, os quais revelam que o controlador difuso na sua globalidade está a funcionar bastante bem, podendo por isso ser utilizado para a simulação e previsão de produção de energia, recorrendo às fontes de energia renováveis consideradas.



## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas em suma as principais conclusões relativas a todo o trabalho desenvolvido, desde pesquisa , elaboração do trabalho prático e do relatório.

No dia a dia, todos nós comunicamos de diversas formas as vivências e experiências que vamos adquirindo, seja através de linguagens verbais ou escritas, entre outras. A representação do ponto de vista computacional destes elementos, torna-se pois fundamental, face aos cada vez mais frequentes desenvolvimentos tecnológicos, por exemplo de máquinas inteligentes que aprendem com o suceder de ações ao longo do tempo. Mas também esta mesma experiência humana pode ser aproveitada para que se possam trabalhar dados que não são numericamente precisos e os sistemas de controlo difuso, permitem a preparação computacional deste tipo de sistemas em que o seu funcionamento, baseia-se num universo de regras, que possuem uma correspondência linguística estabelecida pela teoria dos conjuntos difusos, que definem o grau de verdade ou de falsidade de uma afirmação em relação a um determinado conjunto.

Os fenómenos da natureza como por exemplo o sol e o vento, permitem a produção de energia, e, num mundo atualmente em que se tenta cada vez mais diminuir a poluição que fustiga o planeta terra, faz todo o sentido promover o uso das energias renováveis. Estes

elementos atmosféricos são instáveis e como tal acabam por ser associados a conceitos vagos, muitas vezes relacionados até com o senso comum do ser humano.

A junção de todos estes fatores, favoreceu a tomada de decisão em avançar para a construção de um modelo de controlo difuso com base em energias renováveis. O modelo criado, baseia-se em inferência difusa que tem como suporte os conceitos da lógica e do controlo difuso. Fornecem-se dados relativos à produção de energia, nomeadamente ao aproveitamento individual que é possível obter a partir de um sistema híbrido que conjuga as energias solar e eólica.

O desenvolvimento do trabalho, foi realizado sempre com o intuito de obter um sistema fiável, e que permitisse a interação do utilizador, ao qual é dada a possibilidade de para além de poder saber qual é a quantidade de energia que se consegue obter mediante determinadas condições atmosféricas, conhecer também que parte corresponde ao fornecimento de energia com origem na componente solar e que parte tem origem na eólica. Os dados atmosféricos reais foram provenientes de uma estação meteorológica numa região muito próxima do mar (Porto de Vigo). Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios quer para a componente solar quer para a eólica, revelando-se no entanto melhores os provenientes da solar. Esta constatação é devida à natureza de maior instabilidade do vento relativamente ao sol.

Fatores inerentes aos conjuntos difusos como a base de regras, os tipos de agregação/colapsagem assim como o número de conjuntos difusos, influenciam o desempenho do sistema difuso seja ele qual for. Os parâmetros aplicados neste trabalho foram aqueles para os quais até à presente data se obtiveram os melhores resultados.

## **5.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Nesta secção farei alusões a melhorias que podem ser implementadas no sentido de tornar o funcionamento do controlador difuso desenvolvido mais eficiente.

Ao nível dos desenvolvimentos futuros deste trabalho, é evidente a necessidade de uma melhoria da aplicação criada no que concerne à energia eólica, pois é aqui que reside um erro maior. Com o solucionar deste problema, tornar-se-á viável a criação de uma aplicação complementar em que seja possível colocar como parâmetros de entrada as características de um painel solar e de um gerador eólico, podendo-se assim simular a

viabilidade de determinadas gamas de painéis e turbinas eólicas, a serem utilizados numa determinada aplicação, facilitando assim a conjugação de fatores como os custos de aquisição de equipamento e a energia produzida.

Uma vez que são utilizados dados através da internet, a criação de um acesso remoto ao sistema, possibilitará tornar o programa no seu global mais proveitoso, afastando assim a limitação atual do controlador que restringe o seu funcionamento apenas às máquinas em que esteja instalado. Claro está que para poder ser realizada uma comparação com um controlador convencional, será necessário ter dados climatéricos do local em questão em que se pretende aplicar um sistema híbrido de produção de energia com base em recursos renováveis.

Segundo matérias estudadas aquando do desenvolvimento do estado da arte, a inclusão de um maior número de regras no sistema atual, irá possibilitar a melhoria dos resultados obtidos. Por outro lado, o aumento da quantidade de conjuntos difusos envolvidos no sistema, poderá ser um fator relevante pois permitirá uma sintonização mais fiável do controlador, pois possibilitará criar novas regras para um ajuste mais refinado do modelo concebido.



## *Referências Documentais*

- [Airbreeze, 2014] <http://www.airbreeze.com>
- [Alvarenga, 2000] Carlos Alberto Alvarenga, Ailton Ricaldoni Lobo, *Sistemas solares de energia para telecomunicações*, 2000
- [ASTDR, 2002] Agency for Toxic Substances and Disease Registry — ASTDR, 2002
- [CAC, 2008] Ministério do Ambiente, do Ordenamento do território e do Desenvolvimento Regional, *Conferência da ONU sobre Alterações Climáticas*, dezembro de 2008
- [Castro, 2009] Rui M. G. Castro, *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*, edição 4, DEEC /Área Científica de Energia, Instituto Superior técnico, março de 2009
- [Carneiro, 2009] Joaquim Carneiro, *Projecto Interdisciplinar II, Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos (Sistemas ligados à rede e sistemas autónomos)- Manual do 2º Ano do Mestrado Integrado em Engenharia Têxtil Universidade do Minho(2009)*, 2009
- [CIEMAT, 2007] Ignacio Cruz, Enrique Soria, *Beyond barriers: A strategic R&D Plan for Small Wind Turbines development*, Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, Renewable Energy Division, 2007
- [CMEL, 2007] [www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org),
- [DEEPA, 2007] S.N. Sivandam, S. Sumathi and S.N. Deepa, *Introduction to Fuzzy Logic Using Matlab*, Springer, 2007
- [DR, 2014] Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, *Diário da República*, 1.ª série — N.º 202 — 20 de outubro , Decreto-Lei n.º 153/2014 de 20 de outubro, 2014

- [DRDL, 2007] Ministério da Economia e da Inovação, *Diário da República*, 1ª série–nº 221–2 de novembro, Decreto – Lei 363/2007 de 2 de novembro, 2007  
<http://www.dre.pt/pdf1sdip/2007/11/21100/0797807984.PDF>;  
<http://www.ffiolar.com>;  
<http://energiasalternativas.webnode.com.pt/energias-renovaveis/>
- [Eneralt, 2014] <http://energiasalternativas.webnode.com.pt/energias-renovaveis/energia-geotermica/>  
<http://energiasalternativas.webnode.com.pt/energia-hidrica/>  
<http://energiasalternativas.webnode.com.pt/energias-renovaveis/>
- [ESP, 2007] Ricardo Garcia, *Energia solar ensaia primeiros passos firmes em Portugal*, Jornal Público, março de 2007  
<http://energiasrenovaveis.com/parques-energia-solar-fotovoltaica/>
- [FC Hybrid System, 2003] Luiz Octávio Matos dos Reis, Galdenoro Botura Jr., José Luz Silveira, Paloma Maria Silva Rocha, Rolando Rossi, *Fuzzy control applied to a hybrid system of energy renewable sources: Wind, photovoltaic and biomass gas*, UNESP/UNITAU, 2003
- [FLTUG, 2000] The MathWorks, *Fuzzy Logic Toolbox 2 — User’s Guide*, 2000
- [Geoinfo, 2013] <http://geoinfo.nmt.edu/resources/uranium/enrichment.html>

- [Gipe, 1999] Paul Gipe: Wind Energy Basics, a guide to small and micro wind systems. Chelsea Green Publishing Company, 1999
- [Groover, 1987] Mikell P. Groover, *Automation Production Systems, And Computer Integrated Manufacturing*, Prentice Hall International Editions, 1987
- [ILD, 2000] Professor Doutor Vladimiro Miranda, “*Introdução à Lógica Difusa*”, Aplicações Práticas e Investigação, Curso de Curta Duração, Departamento de Matemática, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 6 e 13 de dezembro de 2000
- [IMP, 2008] Instituto de Meteorologia de Portugal, 2008
- [Inmetro, 2008] Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Informação ao consumidor, Brasil, 15 de outubro de 2008
- [IRE, 2008] David MacGee, P.E., Department of Natural Resources Technology, Assesment Division Website, *Incentives for the use of Renewable Energy*, março de 2008
- [Kyocera, 2014] <http://www.kyocera.com>
- [LNEG, 2010] LNEG-Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2010 <http://www.lneg.pt/>
- [MAODR, 2008] Ministério do Ambiente, do Ordenamento do território e do Desenvolvimento Regional, dezembro de 2008
- [METEOTEST, 2008] METEOTEST, abril de 2008, [www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com)
- [MFAP, 2009] Ministério das Finanças e da Administração Pública, março de 2009, [www.portugal.gov.pt](http://www.portugal.gov.pt)
- [NFLCDPS, 2002] M. N. Cristea, A. Dinu, J. G. Khor, M. McCormick, *Neural and Fuzzy Logic Control of Power Systems*, Elsevier, 2002

- [Ogata, 1970] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall Inc, 1970
- [R Hybrid System, 2001] U.S. Department of Energy — Midwest Research Institute, *Renewable Hybrid System — Applications around the World*, agosto de 2001
- [SET Plan, 2007] Activities of the European Union, *SET Plan*, Summaries of Legislation, dezembro de 2007
- David, A. Spera: *Wind Turbine Technology*, fundamental concepts of wind turbine engineering. ASME Press, 1994
- [Siemens, 2014] <http://www.siemens.com/innovation/pool/features/siemens360/wind-power/index.html>
- [Spera, 1994] David, A. Spera: *Wind Turbine Technology*, fundamental concepts of wind turbine engineering. ASME Press, 1994
- [SSH, 2005] Rafael Tramontini Fernandes, *Supervisão de um sistema híbrido*, Dissertação de mestrado de dezembro de 2005
- [TDI POWER, 2004] Richard Jones, *Charge Control options for valve regulated lead acid batteries — the most common cause of premature battery failure is overcharging*, TDI POWER, 17 de agosto, 2004
- [USEPA, 2002] United States Protection Agency — USEPA, 2002
- [WEC, 2007] *World Energy Consumption*, IEEE Power Engineering Review, agosto de 2007
- [WECA, 1995] Paul Gipe, John Wiley & Sons, *Wind Energy Comes of Age*, IM, 1995
- [WHO, 2002] World Health Organization — WHO, 2002
- [Wiley, 1999] Attilio Bisio, Sharon Boots, The Wiley, *Encyclopedia of Energy and the environment*, 1999

[Wind, 2005]

Wind Energy Association; Renewable Energy House;  
*Wind for Electricity Generation*; 2005

[WSPS, 1999]

Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*, CCR,  
1999



## Anexo A. Sistemas híbridos

Como já foi referido, os sistemas híbridos estão já difundidos por todo o mundo e para os mais diversos fins, sobretudo em equipamentos que recorrem às energias renováveis para a obtenção de energia. Por exemplo podem ser vistos sistemas isolados [R Hybrid System, 2001] em:

- Sistemas solares domésticos, no Brasil a), na China b), no Gana c) e na Índia d), Figura 81.



a)



b)



c)



d)

**Figura 81** Sistemas solares domésticos

— Aplicações para a obtenção de iluminação pública, no Brasil a), no Gana b), na África do Sul c), Figura 82.



a)



b)



c)

**Figura 82 Iluminação pública**

— Em edifícios públicos, como por exemplo nas escolas do Brasil a) e da África do Sul b), Figura 83, ou até mesmo em hospitais no Gana c), no Peru d) e na Índia e), Figura 84.



a)



b)



c)

**Figura 83** Escolas



d)



e)

**Figura 84 Hospitais**

—Aplicações ligadas a bens essenciais, como é o caso da obtenção de água em regiões secas (Figura 85), em que o recurso a bombas de água é necessário, como é o caso da Índia

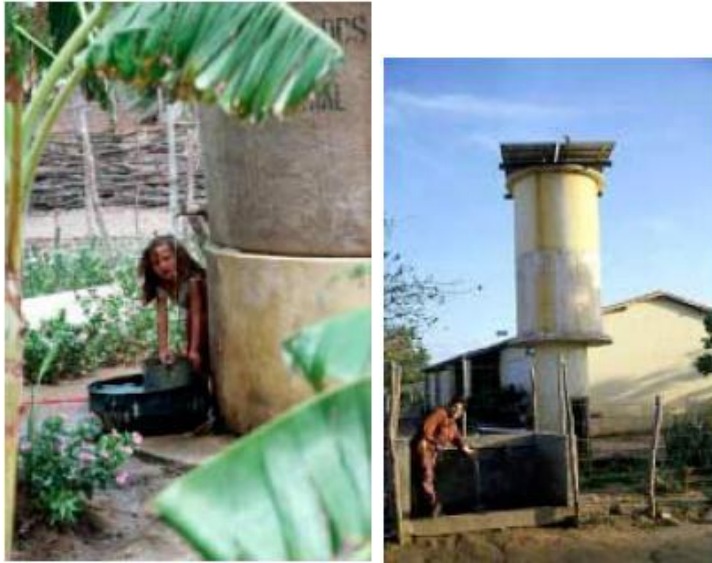
a) e do Brasil b1) e b2) assim como no uso de sistemas de purificação de água, na Nigéria c), no México d) e nas Filipinas e),



a)



b1)



b2)



c)



d)



e)

**Figura 85 Obtenção de água**

— No apoio ao desenvolvimento de micro empresas na China a) (Figura 86), na Índia b) (Figura 86) e também no Continente Africano, no Gana (Figura 87):

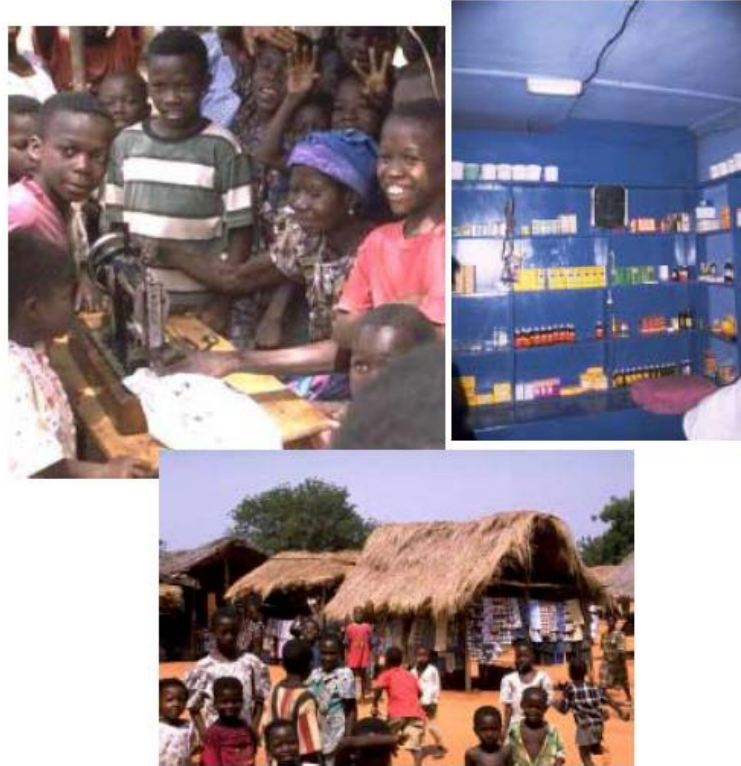


a)



b)

**Figura 86 Apoio a micro empresas**



c)

**Figura 87 Desenvolvimento de micro empresas**

— Também no campo das comunicações estes sistemas isolados mostram-se úteis (Figura 88), nomeadamente em aplicações no Brasil em zonas rurais a);



a)

**Figura 88 Comunicações**

— Sistema híbrido de aplicação doméstica (Figura 89), na Mongólia a), que consiste basicamente na junção de um sistema solar e de um sistema eólico.



a)

**Figura 89 Sistema híbrido doméstico**



## Anexo B. Dimensionamento de um pequeno sistema de produção de energia

### 5.2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos trabalham com uma fonte limitada de energia, que é a energia solar incidente sobre os módulos. Esta fonte é variável, sofre a influência de fatores meteorológicos de difícil previsão. Por outro lado a energia elétrica é solicitada ao sistema de acordo com os requisitos das cargas. O dimensionamento do sistema deve, pois, procurar realizar uma compatibilização dessas duas condições dentro de determinados níveis de fiabilidade e custos.

Para o sistema atender a todas as necessidades de energia por exemplo de uma da estação de telecomunicação com total garantia e fiabilidade, haveria necessidade de se projetar um sistema para as mais severas condições meteorológicas e para as situações de maior uso da estação. Muitas vezes este procedimento leva a sistemas com custos inaceitáveis para o utilizador. O dimensionamento criterioso deve levar em conta os dados meteorológicos existentes para a região, os aparelhos que serão ligados, o tempo de uso dos mesmos, o volume de recursos que se pretende investir na instalação e o grau de fiabilidade no fornecimento de energia. No doseamento desses fatores pode-se chegar a um dimensionamento criterioso, que viabilize o sistema e que atenda aos requisitos especificados.

Os critérios e recomendações a seguir são simplificados e informativos e válidos para sistemas isolados cuja única fonte de energia é a solar. Os envolvidos em projetos de sistemas de maior porte devem procurar ter acesso a procedimentos mais elaborados e rotinas computacionais que simulam diversas condições e levam a dimensionamentos mais criteriosos. De qualquer maneira, é fundamental que o utilizador esteja bem informado das limitações do sistema. Sucessivas simulações podem ser necessárias variando-se os parâmetros de projetos até que se chegue a uma configuração, uma fiabilidade e custo aceitáveis [Alvarenga, 2000].

### 5.2.1. GERADOR FOTOVOLTAICO

O dimensionamento do gerador fotovoltaico está vinculado basicamente a dois parâmetros:

- Aos níveis de energia solar incidente;
- E ao consumo de eletricidade previsto.

Quanto mais ensolarado é o local menor área de captação de energia será necessária. Quanto maior o consumo de energia maior área de captação será necessária. Deve-se iniciar por escolher o tipo de módulo que será empregue.

Normalmente são mais utilizados os módulos com células de silício monocristalino ou policristalino, mas também são utilizados os de silício amorfo. Esta escolha deve levar em conta custos, eficiência, qualidade de fabricação, garantia, vida útil esperada, níveis de degradação do desempenho como o envelhecimento, etc.

O próximo passo é determinar a quantidade de energia que cada módulo vai produzir quando instalado na inclinação escolhida para cada mês. Este cálculo é complexo e normalmente realizado com ajuda de rotinas computacionais. É preciso levar em conta além da inclinação, a redução de desempenho devido a poeira e a degradação.

Uma regra prática usada em projetos de pequenos sistemas é multiplicar a corrente máxima do painel fotovoltaico pelo número médio de horas de sol pleno característico da localidade:

- Por exemplo, 4 módulos de 50 W, com corrente máxima de 3,1A cada, em funcionamento com baterias de 12V, num local com nível médio de 5 horas de sol pleno, produzem cerca de 62 Ah/dia.

Para se definir o número de módulos necessários é preciso acrescentar ao consumo previsto as perdas devidas ao uso do inversor, as perdas nos ciclos de carga e descarga das baterias e perdas gerais na cablagem, disjuntores etc. A quantidade de energia produzida pelos módulos no mês mais crítico deverá ser suficiente para atender às cargas e às perdas.

Existem três decisões básicas na elaboração de um projeto que envolva a aplicação de um gerador fotovoltaico:

- O cálculo da quantidade de energia que será produzida;

- A quantidade de energia que será consumida;
- E a autonomia que se deseja para o sistema em casos de períodos prolongados sem insolação;

Os dois primeiros parâmetros levam ao dimensionamento dos módulos fotovoltaicos ao passo que a autonomia permite dimensionar o banco de baterias. A seguir são feitas algumas considerações para se definir esses parâmetros [Alvarenga, 2000].

### 5.2.2. CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE

O objetivo básico desta fase é alcançar uma relação com níveis médios de radiação solar para cada mês do ano. No caso específico a seguir apresentado, estes dados, foram obtidos em tabelas e mapas solarimétricos regionais no Brasil. Normalmente os dados encontram-se disponíveis em valores da quantidade média de energia solar que incide durante um dia numa área de 1 metro quadrado situada num plano horizontal na superfície da Terra. Estes valores são geralmente especificados em unidades de energia (kWh/m<sup>2</sup>/dia) ou unidades de potência (W/m<sup>2</sup>). Uma outra forma de apresentar os mesmos dados, também bastante utilizado, é transformá-los no número médio diário de horas em que o sol brilharia na sua potência máxima convencional que é de 1 kW/m<sup>2</sup>. Exemplificando, o Norte de Minas Gerais (Três Marias) apresenta um nível médio de radiação solar incidente num plano horizontal de 5 kWh/m<sup>2</sup>/dia ou 208 W/m<sup>2</sup> ou 5 horas de sol pleno, com variações específicas para cada mês do ano. Na Tabela 13 podem ser observados os dados que foram referidos neste parágrafo.

**Tabela 13** Dados solarimétricos da região do Brasil de Três Marias [Alvarenga, 2000]

	kWh/m <sup>2</sup> /dia	W/m <sup>2</sup>	Horas/dia
<b>Janeiro</b>	4,7	197	4,7
<b>Fevereiro</b>	5,8	242	5,8
<b>Março</b>	5,5	230	5,5
<b>Abril</b>	5,0	210	5,0
<b>Mai</b>	4,3	181	4,3
<b>Junho</b>	4,4	182	4,4
<b>Julho</b>	4,4	183	4,4

<b>Agosto</b>	4,7	196	4,7
<b>Setembro</b>	5,0	207	5,0
<b>Outubro</b>	5,5	228	5,5
<b>Novembro</b>	5,6	233	5,6
<b>Dezembro</b>	5,0	207	5,0
<b>Ano</b>	5,0	208	5,0

### 5.2.3. ESCOLHA DO LOCAL PARA INSTALAÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos apresentam melhor desempenho em regiões mais ensolaradas, com baixo nível de nebulosidade e menor número de dias encobertos ou chuvosos no decorrer do ano.

Recomenda-se que sejam instalados, preferencialmente, em regiões com nível médio de radiação solar global no plano horizontal igual ou superior a 4 kWh/m<sup>2</sup>/ dia.

Os módulos fotovoltaicos deverão ser fixados em local livre de sombreamento entre 2 horas após o nascer do sol e 1 hora antes do pôr do sol, em qualquer época do ano. Deverão ser evitados locais em que o crescimento da vegetação possa sombreá-los, devendo ser instalados à menor distância possível das baterias. Considerando o decréscimo de desempenho dos módulos com a deposição de poeira, deverão ser evitados locais próximos de estradas de terra ou com muito tráfego de veículos [Alvarenga, 2000].

### 5.3. SISTEMAS EÓLICOS

No caso das turbinas eólicas, torna-se necessário limitar a potência fornecida pela turbina eólica para valores acima da velocidade nominal do vento, valores estes que ocorrem um número limitado de horas por ano.

Esta tarefa de regulação pode ser efetuada por meios passivos, isto é, desenhando o perfil das pás de modo a que entrem em perda aerodinâmica – *stall* – a partir de determinada velocidade do vento, sem necessidade de variação do passo, ou por meios ativos, isto é, variando o passo das pás – *pitch* – do rotor.

As turbinas *stall* têm as pás fixas, ou seja não rodam em torno de um eixo longitudinal.

A estratégia de controlo de potência assenta nas características aerodinâmicas das pás do rotor que são projetadas para entrar em perda a partir de uma certa velocidade do vento.

Uma vez que as pás estão colocadas a um dado ângulo de passo fixo, quando o ângulo de ataque aumenta para além de um certo valor, a componente de sustentação diminui, ao mesmo tempo que as forças de arrastamento passam a ser dominantes. Nestas condições, a componente T da força que contribui para o binário diminui.

### **5.3.1. GERADOR EÓLICO**

Para converter a energia mecânica disponível no veio em energia elétrica, a opção básica consiste em usar o gerador síncrono (alternador) ou o assíncrono (de indução).

Quando a apropriação da energia eólica é conduzida de maneira a que a exploração se faça a velocidade praticamente constante, o gerador de indução é a opção mais usada pelos fabricantes, tirando partido da sua grande simplicidade e robustez e, conseqüentemente, do seu baixo preço.

A existência de um escorregamento entre a velocidade de rotação e a velocidade de sincronismo permite acomodar parte da turbulência associada ao vento, de modo a tornar a operação deste tipo de máquinas suficientemente suave.

Ao contrário, o funcionamento síncrono do alternador não deixa margem para acolher as flutuações da velocidade do vento, tornando a operação dos geradores síncronos demasiado rígida.

Como principal desvantagem do gerador de indução aponta-se o facto de trocar com a rede a energia reativa de excitação e portanto, necessitar de equipamento adicional para corrigir o fator de potência.

Os sistemas de conversão de energia eólica funcionando a velocidade aproximadamente constante quando equipados com geradores de indução, diretamente ligados a uma rede de frequência constante, correspondem ao chamado conceito CSCF (*Constant speed constant frequency*) e constituem ainda a maioria das aplicações atualmente em operação.

Nos últimos anos, o conceito CSCF tem vindo a ser progressivamente abandonado e a ser substituído pelo chamado conceito VSCF (*Variable speed constant frequency*), com o objetivo de maximizar o aproveitamento da energia eólica.

Os benefícios dos sistemas VSCF incluem:

- Aumento da produção de energia;
- Redução das fadigas nos componentes mecânicos;
- Redução do ruído a baixas velocidades do vento;
- Ligação suave à rede de frequência constante.

A possibilidade oferecida por alguns destes sistemas de dispensarem a caixa de velocidades é uma vantagem importante, pois diminuem as perdas e o ruído associado às baixas velocidades do vento e aumenta, em princípio, a fiabilidade do sistema.

Com a instalação destes equipamentos no terreno, torna-se necessário avaliar corretamente os seus potenciais efeitos negativos. Aspectos relacionados com a eficiência dos conversores eletrónicos, com a produção de harmónicas, com o comportamento do sistema elétrico em condições extremas de vento, com a compatibilidade eletromagnética, assumem, neste quadro, importância significativa [Castro, 2009].

#### **5.4. BANCO DE BATERIAS**

O processo de dimensionamento do banco de baterias deve ser realizado inicialmente e depois sucessivamente aperfeiçoado em função dos demais dimensionamentos e ajustado em função dos custos, disponibilidade de mercado etc. Inicialmente deve-se definir o tipo de bateria que será usado.

Baterias especificamente projetadas para sistemas fotovoltaicos são geralmente mais caras, mas apresentam durabilidade superior, o que pode ser importante para locais isolados e com poucas infraestruturas para troca das mesmas.

Escolhida a bateria a ser usada deve-se definir a profundidade de descarga que se vai trabalhar. Existe um ciclo de carga e descarga que acontece diariamente, ou seja, a energia gerada durante o dia é armazenada na bateria e é fornecida pela mesma durante a noite, descarregando-se. O outro tipo de descarga acontece esporadicamente durante períodos prolongados de nebulosidade quando a bateria atinge níveis de descarga mais elevados.

Quanto mais profundos são os ciclos de descarga/carga menor a vida útil da bateria. Ou seja, se reduzirmos a capacidade das baterias gastaremos menos no início, mas as baterias durarão menos e os gastos de reposição serão maiores. O ponto ótimo depende de análises criteriosas do projetista, levando em conta as curvas de vida útil em função da profundidade da descarga fornecidas pelo fabricante, e de todas as demais circunstâncias. Um valor usado para esta profundidade de descarga para ciclos diários com baterias de chumbo-ácido está em torno de 20%. Para ciclos esporádicos podem ser utilizados ciclos mais profundos da ordem de 40%.

## **5.5. LEVANTAMENTO DAS CARGAS**

Nesta etapa faz-se o levantamento do consumo médio diário de energia elétrica, ou seja, define-se a curva de carga tanto em termos diários, quanto sazonais. Com estes dados consegue-se visualizar as características previstas para o consumo de eletricidade adequando-se o sistema para que o consumo e a produção sejam compatíveis ao longo do dia e ao longo do ano.

Esta determinação é complexa, pois depende do uso que se fará no futuro do sistema, vinculado a hábitos e rotinas dos utilizadores, que são difíceis de determinar e altamente variáveis ao longo do tempo. O produto final desta etapa é um planeamento com definição dos equipamentos que serão ligados, com as suas potências elétricas, tensões (corrente alternada ou contínua) e o tempo diário em que ficarão ligados.

Com estes dados pode ser estimado o consumo diário de cada aparelho. Este consumo pode ser apresentado em Watt-hora ou em Ampère-hora. A tabela seguinte, Tabela 14, exemplifica o levantamento de cargas de uma estação de telecomunicações.

No exemplo da Tabela 14 foram usadas cargas em corrente contínua e em corrente alternada. O consumo médio diário foi de aproximadamente 6,3 kWh/dia ou 520 Ah/dia na tensão de 12 Vcc. Este é um consumo médio, mas o projetista deve levar em conta também

as variações sazonais. Para além disso, deve ter também em conta a necessidade de se usar aparelhos energeticamente mais eficientes, principalmente aqueles que mais pesam no total. Destaca-se neste caso o uso de lâmpadas fluorescentes com balastros eletrónicos, equipamentos de telecomunicações mais eficientes. Deve ser evitado o uso de lâmpadas incandescentes, balastros convencionais para lâmpadas fluorescentes, ar condicionado e outros aparelhos de alto consumo de eletricidade [Alvarenga, 2000].

**Tabela 14 Levantamento de cargas numa estação de telecomunicações [Alvarenga, 2000]**

<b>Aparelho</b>	<b>nº</b>	<b>Tensão</b>	<b>Potência total</b>	<b>Corrente contínua</b>	<b>Operação</b>	<b>Consumo</b>	<b>Consumo</b>
		<b>V</b>	<b>W</b>	<b>A</b>	<b>Horas/dia</b>	<b>Wh/dia</b>	<b>Ah/dia</b>
<b>Lâmpada 20 W</b>	6	12cc	120	10,0	0,1	12	1
<b>Lâmpada 9 W</b>	6	12cc	54	4,5	0,1	5,4	0,5
<b>Rádio</b>	1	120ca	60	5,0	24	1440	120
<b>Transmissor</b>	1	120ca	100	8,3	12	1200	99,6
<b>Recetor</b>	1	120ca	100	8,3	24	2400	199,2
<b>Rádio</b>	1	12cc	50	4,2	24	1200	100,8
<b>Total</b>	1 6		484	40,3		6257	521,1

## Anexo C. Regras Difusas Utilizadas no Controlador Difuso de Energias Renováveis: CDER

```
[System]
Name='CDER'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=4
NumOutputs=3
NumRules=205
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='TEMPERATURA'
Range=[-5 40]
NumMFs=5
MF1='MuitoBaixo':'gaussmf',[4.78 -12.50333333333333]
MF2='Baixo':'gauss2mf',[3.82 -1.30357142857138 3.82 0.946428571428573]
MF3='Ameno':'gaussmf',[4.78 4.76190476190482]
MF4='Alto':'gaussmf',[5.15 9.57904761904764]
MF5='MuitoAlto':'gaussmf',[5.32 21.3214285714286]

[Input2]
Name='IRRADIANCIA'
Range=[0 3250]
NumMFs=5
MF1='MuitoFraco':'gaussmf',[345 257.592592592592]
MF2='Fraco':'gaussmf',[270 889.687830687831]
MF3='Medio':'gaussmf',[209 1374.69841269841]
MF4='Alto':'gaussmf',[375 1899.04761904762]
MF5='MuitoAlto':'gaussmf',[412 2389.708994709]

[Input3]
Name='VENTO'
Range=[0 35]
NumMFs=5
MF1='MuitoFraco':'gaussmf',[4.37 4.16259259259259]
MF2='Fraco':'gaussmf',[4.71782531878508 8.01]
MF3='Normal':'gaussmf',[5.44 26.0074074074073]
MF4='Forte':'gaussmf',[3.72 28.3796296296297]
MF5='MuitoForte':'gaussmf',[3.72 31.7592592592594]

[Input4]
Name='HORASSOL'
Range=[0 24]
NumMFs=5
MF1='MuitoEscasso':'gaussmf',[2.55 -1.52344444444445]
MF2='Escasso':'gaussmf',[2.55 1.93601587301587]
MF3='Razoável':'gaussmf',[2.55 3.55555555555557]
MF4='Elevado':'gaussmf',[2.55 6.37746031746039]
```

MF5='MuitoElevado': 'gausmf', [2.24 9.59365079365077]

[Output1]

Name='ENERGIA'

Range=[0 1]

NumMFs=9

MF1='mf1': 'trimf', [-0.125 0 0.125]

MF2='mf2': 'trimf', [0 0.125 0.25]

MF3='mf3': 'trimf', [0.125 0.25 0.375]

MF4='mf4': 'trimf', [0.25 0.375 0.5]

MF5='mf5': 'trimf', [0.375 0.5 0.625]

MF6='mf6': 'trimf', [0.5 0.625 0.75]

MF7='mf7': 'trimf', [0.625 0.75 0.875]

MF8='mf8': 'trimf', [0.75 0.875 1]

MF9='mf9': 'trimf', [0.875 1 1.125]

[Output2]

Name='SOLAR'

Range=[0 1]

NumMFs=5

MF1='MuitoPouco': 'trimf', [-0.212492063492063 0.0375079365079365  
0.287507936507936]

MF2='Pouco': 'trimf', [-0.0184719576719576 0.231328042328042  
0.481328042328041]

MF3='Suficiente': 'trimf', [0.30026455026455 0.55026455026455  
0.800264550264549]

MF4='Alto': 'trimf', [0.541873015873017 0.786873015873017 1.03587301587302]

MF5='MuitoAlto': 'trimf', [0.74993650793651 1.00033650793651  
1.24993650793651]

[Output3]

Name='EOLICA'

Range=[0 1]

NumMFs=5

MF1='MuitoPouco': 'trimf', [-0.279100529100529 -0.0291005291005292  
0.220899470899471]

MF2='Pouco': 'trimf', [-0.179856084656085 0.0703439153439161  
0.320343915343916]

MF3='Suficiente': 'trimf', [0.287037037037037 0.537037037037037  
0.787037037037037]

MF4='Alto': 'trimf', [0.724867724867725 0.974867724867725 1.22486772486772]

MF5='MuitoAlto': 'trimf', [0.906130158730159 1.15613015873016  
1.40573015873016]

[Rules]

1 1 1 1, 1 1 1 (0.5) : 1

2 1 1 1, 1 1 1 (0.5) : 1

3 1 1 1, 2 1 1 (0.5) : 1

4 1 1 1, 2 1 1 (0.5) : 1

5 1 1 1, 3 2 1 (0.5) : 1

1 2 2 2, 1 1 2 (0.5) : 1

2 2 2 2, 2 1 2 (0.5) : 1

3 2 2 2, 2 1 2 (0.5) : 1

4 2 2 2, 3 2 2 (0.5) : 1

5 2 2 2, 3 2 2 (0.5) : 1

1 3 3 3, 2 1 3 (0.5) : 1

2 3 3 3, 3 2 3 (0.5) : 1

3 3 3 3, 3 2 3 (0.5) : 1

4 3 3 3, 3 2 3 (0.5) : 1

5 3 3 3, 4 2 3 (0.5) : 1

1 4 4 4, 3 2 4 (0.5) : 1

2 4 4 4, 4 3 4 (0.5) : 1  
 3 4 4 4, 5 3 4 (0.5) : 1  
 4 4 4 4, 6 3 4 (0.4) : 1  
 5 4 4 4, 7 4 4 (0.4) : 1  
 1 5 5 5, 5 2 5 (0.4) : 1  
 2 5 5 5, 6 3 5 (0.4) : 1  
 3 5 5 5, 7 3 5 (0.4) : 1  
 4 5 5 5, 8 4 5 (0.5) : 1  
 5 5 5 5, 9 4 5 (0.5) : 1  
 1 2 1 1, 1 1 1 (1) : 1  
 1 3 1 1, 2 1 1 (1) : 1  
 1 4 1 1, 3 2 1 (1) : 1  
 1 5 1 1, 3 2 1 (1) : 1  
 2 1 2 2, 1 1 2 (1) : 1  
 2 3 2 2, 2 1 2 (1) : 1  
 2 4 2 2, 3 2 2 (1) : 1  
 2 5 2 2, 4 2 2 (1) : 1  
 3 1 3 3, 2 1 3 (1) : 1  
 3 2 3 3, 3 2 3 (1) : 1  
 3 4 3 3, 5 3 3 (1) : 1  
 3 5 3 3, 6 3 3 (1) : 1  
 4 1 4 4, 3 2 4 (0.5) : 1  
 4 2 4 4, 4 2 4 (0.5) : 1  
 4 3 4 4, 5 3 4 (1) : 1  
 4 5 4 4, 7 4 4 (1) : 1  
 5 1 5 5, 3 2 5 (0.5) : 1  
 5 2 5 5, 5 3 5 (0.5) : 1  
 5 3 5 5, 7 4 5 (0.5) : 1  
 5 4 5 5, 8 4 5 (1) : 1  
 1 1 2 1, 3 2 2 (1) : 1  
 1 1 3 1, 4 2 3 (1) : 1  
 1 1 4 1, 6 3 4 (1) : 1  
 1 1 5 1, 8 4 5 (0.5) : 1  
 2 2 1 2, 2 1 1 (1) : 1  
 2 2 3 2, 5 3 3 (1) : 1  
 2 2 4 2, 6 3 4 (1) : 1  
 2 2 5 2, 8 4 5 (1) : 1  
 3 3 1 3, 3 2 1 (1) : 1  
 3 3 2 3, 4 2 2 (1) : 1  
 3 3 4 3, 7 4 4 (1) : 1  
 3 3 5 3, 8 4 5 (1) : 1  
 4 4 1 4, 4 3 1 (1) : 1  
 4 4 2 4, 5 3 2 (1) : 1  
 4 4 3 4, 6 4 3 (1) : 1  
 4 4 5 4, 8 4 5 (1) : 1  
 5 5 1 5, 4 2 1 (1) : 1  
 5 5 2 5, 6 3 2 (1) : 1  
 5 5 3 5, 7 4 3 (1) : 1  
 5 5 4 5, 8 5 4 (0.5) : 1  
 1 1 1 2, 1 1 1 (0.5) : 1  
 1 1 1 3, 2 1 1 (0.5) : 1  
 1 1 1 4, 2 1 1 (0.5) : 1  
 1 1 1 5, 3 2 1 (0.5) : 1  
 2 2 2 1, 1 1 2 (0.5) : 1  
 2 2 2 3, 2 1 2 (0.5) : 1  
 2 2 2 4, 3 2 2 (0.5) : 1  
 2 2 2 5, 3 2 2 (0.5) : 1  
 3 3 3 1, 2 1 3 (0.5) : 1  
 3 3 3 2, 3 2 3 (0.5) : 1  
 3 3 3 4, 3 3 3 (0.5) : 1  
 3 3 3 5, 4 3 3 (0.5) : 1

4 4 4 1, 3 2 4 (0.5) : 1  
 4 4 4 2, 4 3 4 (0.5) : 1  
 4 4 4 3, 5 3 4 (0.5) : 1  
 4 4 4 5, 7 4 4 (0.5) : 1  
 5 5 5 1, 5 2 5 (0.5) : 1  
 5 5 5 2, 6 3 5 (0.5) : 1  
 5 5 5 3, 7 4 5 (1) : 1  
 5 5 5 4, 8 4 5 (0.5) : 1  
 2 2 1 1, 1 2 1 (1) : 1  
 3 3 1 1, 2 3 1 (1) : 1  
 4 4 1 1, 3 3 1 (1) : 1  
 5 5 1 1, 3 4 1 (1) : 1  
 1 1 2 2, 1 1 2 (1) : 1  
 3 3 2 2, 3 3 2 (1) : 1  
 4 4 2 2, 4 3 2 (1) : 1  
 5 5 2 2, 5 4 2 (1) : 1  
 1 1 3 3, 2 2 3 (1) : 1  
 2 2 3 3, 3 3 3 (1) : 1  
 4 4 3 3, 6 4 3 (1) : 1  
 5 5 3 3, 7 4 3 (1) : 1  
 1 1 4 4, 3 2 4 (0.5) : 1  
 2 2 4 4, 5 3 4 (0.5) : 1  
 3 3 4 4, 6 3 4 (1) : 1  
 5 5 4 4, 8 4 4 (1) : 1  
 1 1 5 5, 3 2 5 (0.5) : 1  
 2 2 5 5, 5 3 5 (0.5) : 1  
 3 3 5 5, 7 4 5 (0.5) : 1  
 4 4 5 5, 8 4 5 (1) : 1  
 2 1 2 1, 3 1 2 (1) : 1  
 3 1 3 1, 4 1 3 (1) : 1  
 4 1 4 1, 6 1 4 (1) : 1  
 5 1 5 1, 8 1 5 (0.5) : 1  
 1 2 1 2, 2 2 1 (1) : 1  
 3 2 3 2, 5 2 3 (1) : 1  
 4 2 4 2, 7 2 4 (1) : 1  
 5 2 5 2, 8 2 5 (0.5) : 1  
 1 3 1 3, 3 3 1 (1) : 1  
 2 3 2 3, 4 3 2 (1) : 1  
 4 3 4 3, 7 3 4 (1) : 1  
 5 3 5 3, 8 3 4 (1) : 1  
 1 4 1 4, 4 3 1 (1) : 1  
 2 4 2 4, 5 3 2 (1) : 1  
 3 4 3 4, 6 4 3 (1) : 1  
 5 4 5 4, 8 4 5 (1) : 1  
 1 5 1 5, 4 4 1 (1) : 1  
 2 5 2 5, 6 4 2 (1) : 1  
 3 5 3 5, 7 5 3 (1) : 1  
 4 5 4 5, 8 5 4 (1) : 1  
 2 1 1 2, 1 1 1 (1) : 1  
 3 1 1 3, 2 1 1 (1) : 1  
 4 1 1 4, 2 1 1 (1) : 1  
 5 1 1 5, 3 2 1 (1) : 1  
 1 2 2 1, 1 1 2 (1) : 1  
 3 2 2 3, 2 1 2 (1) : 1  
 4 2 2 4, 3 2 2 (1) : 1  
 5 2 2 5, 3 2 2 (1) : 1  
 1 3 3 1, 2 1 3 (1) : 1  
 2 3 3 2, 3 2 3 (1) : 1  
 4 3 3 4, 3 2 3 (1) : 1  
 5 3 3 5, 4 2 3 (1) : 1  
 1 4 4 1, 2 1 4 (0.5) : 1


2 4 4 2, 3 2 4 (0.5) : 1  
 3 4 4 3, 4 2 4 (0.5) : 1  
 5 4 4 5, 6 3 4 (1) : 1  
 1 5 5 1, 2 1 5 (0.5) : 1  
 2 5 5 2, 4 2 5 (0.5) : 1  
 3 5 5 3, 6 3 5 (0.5) : 1  
 4 5 5 4, 8 4 5 (0.5) : 1  
 1 2 2 1, 2 1 2 (1) : 1  
 1 3 3 1, 4 2 3 (1) : 1  
 1 4 4 1, 6 3 4 (0.5) : 1  
 1 5 5 1, 7 4 5 (0.5) : 1  
 2 1 1 2, 1 1 1 (1) : 1  
 2 3 3 2, 5 3 3 (1) : 1  
 2 4 4 2, 6 3 4 (1) : 1  
 2 5 5 2, 7 4 5 (0.5) : 1  
 3 1 1 3, 2 1 1 (1) : 1  
 3 2 2 3, 3 2 2 (1) : 1  
 3 4 4 3, 7 4 4 (1) : 1  
 3 5 5 3, 8 4 5 (1) : 1  
 4 1 1 4, 2 1 1 (1) : 1  
 4 2 2 4, 4 2 2 (1) : 1  
 4 3 3 4, 6 3 3 (1) : 1  
 4 5 5 4, 8 4 5 (1) : 1  
 5 1 1 5, 3 2 1 (1) : 1  
 5 2 2 5, 5 3 2 (1) : 1  
 5 3 3 5, 7 4 3 (1) : 1  
 5 4 4 5, 8 4 4 (1) : 1  
 1 2 1 2, 2 1 1 (1) : 1  
 1 3 1 3, 3 2 1 (1) : 1  
 1 4 1 4, 5 3 1 (1) : 1  
 1 5 1 5, 8 4 1 (1) : 1  
 2 1 2 1, 1 1 2 (1) : 1  
 2 3 2 3, 4 2 2 (1) : 1  
 2 4 2 4, 6 3 2 (1) : 1  
 2 5 2 5, 8 4 2 (1) : 1  
 3 1 3 1, 2 1 3 (1) : 1  
 3 2 3 2, 3 2 3 (1) : 1  
 3 4 3 4, 7 4 3 (1) : 1  
 3 5 3 5, 8 4 3 (1) : 1  
 4 1 4 1, 3 2 4 (0.5) : 1  
 4 2 4 2, 5 3 4 (0.5) : 1  
 4 3 4 3, 6 3 4 (0.5) : 1  
 4 5 4 5, 8 4 4 (0.7) : 1  
 5 1 5 1, 3 2 5 (0.5) : 1  
 5 2 5 2, 5 3 5 (0.5) : 1  
 5 3 5 3, 6 3 5 (0.5) : 1  
 5 4 5 4, 8 4 5 (1) : 1  
 1 1 2 2, 3 1 2 (1) : 1  
 1 1 3 3, 4 1 3 (1) : 1  
 1 1 4 4, 6 1 4 (0.5) : 1  
 1 1 5 5, 8 1 5 (0.5) : 1  
 2 2 1 1, 2 2 1 (1) : 1  
 2 2 3 3, 5 2 3 (1) : 1  
 2 2 4 4, 6 2 4 (0.5) : 1  
 2 2 5 5, 7 2 5 (0.5) : 1  
 3 3 1 1, 3 3 1 (1) : 1  
 3 3 2 2, 5 3 2 (1) : 1  
 3 3 4 4, 7 3 4 (1) : 1  
 3 3 5 5, 8 3 4 (1) : 1  
 4 4 1 1, 4 3 1 (1) : 1  
 4 4 2 2, 5 3 2 (1) : 1

4 4 3 3, 6 4 3 (1) : 1  
4 4 5 5, 8 4 5 (1) : 1  
5 5 1 1, 4 4 1 (1) : 1  
5 5 2 2, 5 4 2 (1) : 1  
5 5 3 3, 7 5 3 (1) : 1  
5 5 4 4, 8 5 4 (1) : 1

## Anexo D. Características dos módulos utilizados

Neste anexo constam elementos relativos aos equipamentos utilizados, para possibilitar a análise de resultados, através da comparação entre valores esperados reais face aos obtidos em simulação pelo controlador difuso.

O painel fotovoltaico, possui os seguintes dados técnicos, presentes na Figura 90:



OVERVIEW	SPECIFICATIONS	WARRANTY
<b>160w 12v Portable Solar Panel with Kyocera Japanese Cells</b>		
Max Power:	160W	
Power Tolerance:	-1%~+3%	
Max Power Voltage:	17.99V	
Max Power Current:	9A	
Open-Circuit Voltage:	22.19V	
Short-Circuit Current:	9.7A	
Maximum System Voltage:	1000v	
Dimensions:	Folded: 860mm x 685mm x 72mm Opened: 860mm x 1396mm x 35mm	
Weight:	Approx. 16.5kg	
Test Condition:	1000W/m2, AM1.5, 25°C	
<b>More information about this product</b>		
<a href="#">» OVERVIEW</a>	<a href="#">» WARRANTY</a>	


Figura 90 Dados técnicos do Painel Fotovoltaico [Kyocera, 2014]

Quanto ao gerador eólico escolhido (Figura 91):



Figura 91 Gerador Eólico [Airbreeze, 2014]

Este gerador eólico possui as seguintes especificidades, que se apresentam na Figura 92:



**air BREEZE**

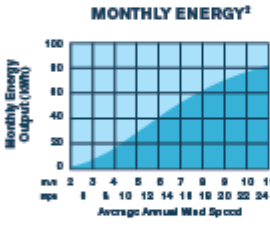
**SMALL WIND. BIG ENERGY.**

The most powerful wind generator in its class.

The all-new Air Breeze. Quieter, more efficient, and precision engineered to deliver more energy at lower wind speeds than any other wind generator in its class.<sup>1</sup> The Air Breeze is the latest generation of AIR – with more than 140,000 sold in 120 countries – the world's most popular small wind generator.

- Injection-molded composite blades
- Microprocessor-based smart internal regulator with peak power tracking
- Aircraft-quality aluminum alloy castings
- Brushless neodymium alternator
- Maintenance-free – only two moving parts

**MONTHLY ENERGY<sup>2</sup>**



**POWER THIS WITH AIR BREEZE**

Model Number	437	458	7116	7343	1708
Monthly Energy Output (kWh)	10	15	25	40	60
Average Annual Wind Speed (mph)	3 (1.0)	4 (1.4)	6 (1.8)	8 (2.4)	10 (3.0)

**THREE YEAR WARRANTY**

**Southwest Windpower**  
1801 W. Route 68  
Flagstaff, AZ 86001 USA  
928.779.9463  
www.airbreeze.com

Makers of Skystream 3.7™ / AIR / Whisper

<sup>1</sup>Wind generators with the same swept area as Air Breeze.  
<sup>2</sup>Data collected by the North Carolina Small Wind Initiative/Appalachian State University Small Wind Research and Demonstration Facility, Beech Mountain, NC, USA.

♻️ Printed on recycled paper with vegetable inks using 100% renewable energy.

0-DAL-1102-01 09-07-08

Figura 92 Dados técnicos do Gerador Eólico [Airbreeze, 2014]

