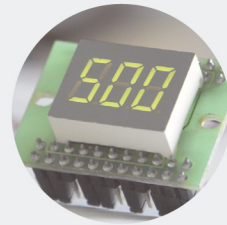




MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR DIFUSO PARA CONTROLO DE UM PEQUENO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA COM BASE EM RECURSOS RENOVÁVEIS

SÉRGIO DA SILVA LOPES RODRIGUES

novembro de 2020



MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR DIFUSO PARA CONTROLO DE UM PEQUENO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA COM BASE EM RECURSOS RENOVÁVEIS

SÉRGIO DA SILVA LOPES RODRIGUES

Novembro de 2020



Instituto Superior de
Engenharia do Porto

MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR DIFUSO PARA CONTROLO DE UM PEQUENO SISTEMA DE PRODUÇÃO DE ENERGIA COM BASE EM RECURSOS RENOVÁVEIS

Sérgio da Silva Lopes Rodrigues
novembro 2020

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

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

Candidato: Sérgio da Silva Lopes Rodrigues, Nº 1120112, 1120112@isep.ipp.pt

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



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

2020

A motivação da realização deste trabalho surge num dos momentos mais difíceis da minha vida. Por todo o apoio, dedico este trabalho à minha esposa Sandra, que sem ela, esta viagem teria sido como percorrer uma estrada acidentada cheia de obstáculos, e ela converteu-a, com a força que lhe é característica, numa estrada com as paisagens mais belas. Durante essa viagem, nasceu o Luisinho

Agradecimentos

Agradeço a todos os que estiveram presentes nos momentos que acompanharam a elaboração deste trabalho. Nomeadamente à Sandra, à minha Mãe, ao meu Pai, ao meu Irmão, à minha Tia, aos meus Padrinhos, ao Samuel, e todos os outros que, não mencionando a literatura do seu nome, sabem que contribuíram.

Um especial agradecimento à Doutora Isabel Jesus, pelo suporte e compreensão prestados ao longo desta jornada.

Resumo

A produção de energia com base em recursos renováveis, tem vindo a evoluir face à produção de energia adquirida recorrendo a recursos fósseis. A utilização de um modelo de controlo eficiente, permitirá uma utilização também eficiente da energia produzida, evitando, assim, o desperdício.

O Controlo Lógico Difuso utiliza os princípios formais do raciocínio do ser humano, e aponta a uma classificação aproximada, em vez de uma classificação exata. Este tipo de controlo, permite-nos classificar, por exemplo, se a qualidade do ar num determinado espaço é "meia boa" ou "meia má", além da tradicional classificação de "boa" e "má".

Este trabalho tem como objetivos principais, a pesquisa de modelos de controlo de gestão na produção de energia com base em recursos renováveis, bem como o desenvolvimento de um modelo de simulação de um controlador, recorrendo ao conceito de Lógica Difusa. Foram utilizadas as ferramentas do *software* MATLAB para elaboração e simulação do controlador difuso. Posteriormente foi comparada a resposta do controlador com resultados calculados analiticamente.

Numa primeira fase deste trabalho foram estudados os recursos energéticos bem como os sistemas de geração de energias renováveis, nomeadamente a energia eólica e a energia solar, geradas pelo vento e pelo sol, respetivamente. De seguida foi efetuado um estudo sobre os conceitos da lógica difusa.

Foi realizado o estudo e desenvolvimento de uma aplicação gráfica em MATLAB, com recurso à biblioteca *Fuzzy Logic Toolbox*, a qual permite a aquisição de dados climáticos provenientes de um *website*, e utiliza estes dados como entrada de um controlador difuso, para a obtenção de uma resposta do sistema de controlo.

No final, foram analisados os resultados obtidos da resposta do controlador, e comparados com os cálculos teóricos da produção de energia solar e eólica, e apresentadas as

conclusões da realização deste projeto, bem como possíveis desenvolvimentos futuros tendo por base este trabalho.

Palavras-Chave

Energias renováveis, Energia Solar, Energia Eólica, Lógica difusa, Controlador Difuso.

Abstract

The energy production based on renewable resources, has been evolving compared to the production of energy acquired using fossil resources. The use of an efficient control model will also allow the use of useful energy, thus avoiding waste.

Fuzzy Logic Control uses the formal principles of human reasoning, and points to an approximate classification, rather than an exact classification. This type of control allows us to classify, for example, if the air quality in a selected space is "half good" or "half bad", in addition to the traditional classification of "good" and "bad".

This work has as main objectives, the research of management control models in the production of energy based on renewable resources, as well as the development of a simulation model of a controller, using the concept of Fuzzy Logic. It was used the MATLAB software tools for build and simulate the fuzzy controller. Furthermore, the controller response was compared with analytically calculated results.

At the beginning of this work, studies about energy resources as well as renewable energy generation systems were made, namely wind and solar energy, generated by the wind and the sun, respectively. Next, a study was carried out on the concepts of fuzzy logic.

The study and development of a graphic application in MATLAB was carried out, using the Fuzzy Logic Toolbox library, which allows the acquisition of climatic data from a website, and uses this data as fuzzy controller's input, to obtain a system control response.

In the last part, the results obtained from the controller response were analyzed and compared with the theoretical calculations of the solar and wind energy production, and some conclusions about this project were drawn, as well as possible future developments based on this work.

Keywords

Renewable energies, Solar Energy, Wind Energy, Fuzzy Logic, Fuzzy Controller.

Índice

AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ACRÓNIMOS	XXVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO	2
1.3 CALENDARIZAÇÃO	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. PRODUÇÃO DE ENERGIA COM BASE EM RECURSOS RENOVÁVEIS: PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E AEROGERADORES	5
2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRIA	6
2.2 TECNOLOGIA DAS TURBINAS EÓLICAS	17
2.3 TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS	24
2.4 POTÊNCIA DO VENTO	28
2.5 TECNOLOGIA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	29
2.6 SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEUS CONSTITUINTES	32
2.7 MICRO-REDE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA E SEUS COMPONENTES	38
2.8 POTENCIA GERADA POR UM PAINEL FOTOVOLTAICO	40
3. LÓGICA DIFUSA	41
3.1 NOTA HISTÓRICA	42
3.2 CONJUNTOS DIFUSOS E LÓGICA DIFUSA	43
3.3 OPERAÇÕES COM CONJUNTOS DIFUSOS	52
3.4 FUNÇÕES DE PERTENÇA	55
3.5 LÓGICA DIFUSA: PRINCÍPIOS BÁSICOS	62
3.6 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS	63
3.7 INFERÊNCIA	67
3.8 COLAPSAGEM	73
3.9 PROPOSIÇÕES DIFUSAS	77

3.10	CONTROLADORES STANDARD DE LÓGICA DIFUSA	80
4.	MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR DIFUSO COM BASE EM RECURSOS RENOVÁVEIS	89
4.1	INTRODUÇÃO	89
4.2	MATLAB: FUZZY LOGIC TOOLBOX	90
4.3	CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE INFERÊNCIA DIFUSA (FIS)	91
4.4	DESENHO DO SISTEMA DE CONTROLO	93
5.	RESULTADOS OBTIDOS.....	119
5.1	RESPOSTA DO SISTEMA	130
6.	CONCLUSÕES	135
6.1	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	136
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	137

Índice de Figuras

Figura 1 -Evolução do diâmetro do rotor e da capacidade das turbinas eólicas [3].	8
Figura 2 - Matriz de painéis solares da ISS [6].	12
Figura 3 –Produção total de energia renovável dos 10 países com maior percentagem de produção, de acordo com os dados da REN21 [7].	14
Figura 4 – Evolução da capacidade instalada em Portugal (MW) [8].	16
Figura 5 – Aumento da capacidade instalada FER em Portugal, entre 2014 e 2018 (MW) [8].	17
Figura 6 - Visão global de uma turbina eólica. (1) Pás do rotor, (2) <i>Nacelle</i> , (3) Torre, (4) Transformador, (5) Fundação [10].	18
Figura 7 - Vários tipos de torres de turbinas eólicas [9].	18
Figura 8 - Vários tipos de fundações para turbinas eólicas [9].	19
Figura 9 - Fundação do tipo <i>jacket</i> , para turbinas <i>offshore</i> [9].	20
Figura 10 - Estrutura tipo balde de sucção [9].	21
Figura 11 - Estrutura tripilar [9].	21
Figura 12 - Estrutura do tipo <i>tripod</i> [9].	22
Figura 13 - Componentes do aerogerador [9].	23
Figura 14 - Turbina Darrieus [11].	25
Figura 15 - Turbina Darrieus <i>UrWind O2</i> de rotor "H" [11].	25
Figura 16 - Princípio de funcionamento de um rotor de uma turbina Savonius [11].	26

Figura 17 - Exemplo de uma turbina eólica do tipo Savonius [11].	27
Figura 18 – Parque eólico em localização desconhecida [7].	28
Figura 19 - Efeito fotovoltaico numa célula solar [13].	30
Figura 20 - Curva Corrente-Tensão característica típica de uma célula solar, a diferentes níveis de luz [12].	31
Figura 21 - Célula solar de silicone monocristalino [12].	32
Figura 22 – Exemplo de um módulo solar da marca Renogy [14].	33
Figura 23 - Módulos solares numa típica montagem de solo [15].	34
Figura 24 - Painéis fotovoltaicos com sistema de seguimento solar [16].	35
Figura 25 – Controlador de carga MPPT do fabricante EPEVER.	37
Figura 26 - Estrutura exemplo de uma micro-rede [18].	39
Figura 27 – Legenda dos parâmetros dos conjuntos difusos.	46
Figura 28 – Conjuntos (a) convexo e (b) não-convexo[25].	49
Figura 29 - Projeções 3D (linha superior) e projeções de contorno (linha inferior) das quatro t-conormas T_M , T_P , T_L e T_D [26].	51
Figura 30 – Projeções 3D (linha superior) e projeções de contorno (linha inferior) das quatro t-conormas S_M , S_P , S_L e S_D [26].	52
Figura 31 - União de dois conjuntos difusos A e B [25].	53
Figura 32 - Interseção de dois conjuntos difusos A e B [25].	54
Figura 33 - Complemento do conjunto difuso [25].	55

Figura 34- Funções de pertença dos conjuntos difusos: BEBÉ, CRIANÇA, JOVEM, IDOSO e MUITO IDOSO [24].	56
Figura 35 - Curva de pertença para a função γ [24].	57
Figura 36 - Uma forma típica de uma função S [24].	58
Figura 37 - Uma forma típica de uma função L [24].	59
Figura 38 - Uma forma típica de uma função de pertença triangular [24].	60
Figura 39 - Típica representação gráfica de uma função Π [24].	61
Figura 40 - Típica representação gráfica de uma função Gaussiana [24].	62
Figura 41 - Estrutura hierárquica de uma variável linguística [27].	64
Figura 42 - Função de Compatibilidade de "jovem" [27].	65
Figura 43 - Funções de compatibilidade de "jovem", "muito jovem" e "não jovem" [27].	66
Figura 44 - Valores linguísticos triangulares [28].	67
Figura 45 – Representação da função de pertença "normalmente" e "normalmente2" [21].	72
Figura 46 -Sistema <i>fuzzy</i> baseado em regras 'se-então' [29].	74
Figura 47 – Exemplo de função B'y [30].	75
Figura 48 - Construção gráfica de um sinal de controlo, num controlador PD difuso [32].	79
Figura 49 - Controlador lógico difuso.	81
Figura 50 – Difusão [33].	81
Figura 51 - Regras de avaliação [33].	83
Figura 52 - Agregação das regras de saída [33].	83

Figura 53 – Colapsagem [33].	84
Figura 54 – Representação dos conjuntos de restrição da variável linguística “temperatura” [34].	85
Figura 55 – Estrutura do MATLAB com a <i>fuzzy logic toolbox</i> [36].	91
Figura 56 – Apresentação do módulo <i>Fuzzy Logic Designer</i> do software MATLAB.	91
Figura 57 – Apresentação do módulo de edição das funções de pertença das variáveis escolhidas.	92
Figura 58 – Linha de Comandos do <i>software</i> MATLAB 20 19b.	95
Figura 59 – Esquema de acesso à aplicação <i>Fuzzy Logic Designer</i> do <i>software</i> MATLAB 20 19b.	95
Figura 60 – Módulo da <i>toolbox Fuzzy Logic Designer</i> .	95
Figura 61 – Menu para a criação de variáveis linguísticas de entrada e de saída.	96
Figura 62 – Editor de funções de pertença.	97
Figura 63 – Variável linguística difusa da entrada TEMPERATURA.	97
Figura 64 – Variável linguística difusa de entrada IRRADIANCIA.	98
Figura 65 – Variável linguística difusa de entrada VENTO.	99
Figura 66 – Variável linguística difusa de entrada CONSUMO.	99
Figura 67 – Variável linguística difusa de saída SOLAR.	100
Figura 68 – Variável linguística difusa de saída EOLICA.	101
Figura 69 – Variável linguística difusa de saída REDE.	101

Figura 70 – Gráfico dos resultados <i>fuzzy</i> da variável de saída SOLAR, face aos valores das entradas IRRADIANCIA e TEMPERATURA.	102
Figura 71 – Apresentação das funções de leitura dos dados de uma tabela, no módulo de simulação Simulink.	103
Figura 72 – Subsistemas para cálculo das potências eólica e solar.	104
Figura 73 – Módulo controlador difuso no ambiente Simulink.	105
Figura 74 – Exemplo de utilização da função “ <i>To Workspace</i> ”, para armazenamento dos valores resultantes da simulação.	105
Figura 75 – Aspeto da aplicação FREC.	106
Figura 76 – Diagrama do funcionamento do projeto.	107
Figura 77 – Fluxograma do funcionamento da aplicação.	108
Figura 78 – Botões com as opções de encaminhamento para website SNIRH, verificação do modelo Simulink e geração de resultados <i>fuzzy</i> .	109
Figura 79 – Campo de seleção do ficheiro extraído.	109
Figura 80 – Tabela com os dados do ficheiro “ <i>serie_17082020095224.csv</i> ”.	110
Figura 81 – Representação gráfica dos dados correspondentes às variáveis de entrada do controlador <i>fuzzy</i> .	111
Figura 82 – Ampliação da zona assinalada no gráfico da variável de entrada TEMPERATURA, para verificação do valor de temperatura no dia 11 de agosto de 2020 às 15:00.	111
Figura 83 - Representação gráfica dos valores de saída do controlador <i>fuzzy</i> .	112
Figura 84 – Aerogerador da marca TESUP, modelo Master940 [37].	113
Figura 85 – Painel fotovoltaico do fabricante SunPower, modelo E20-435-COM [38].	115

Figura 86 – Representação gráfica dos resultados obtidos, através da produção de energia com recurso ao painel solar, entre os dias 9 e 13 de setembro de 2019.	121
Figura 87 – Representação gráfica dos resultados obtidos, através da produção de energia com recurso ao aerogerador, entre os dias 9 e 13 de setembro de 2019.	123
Figura 88 – Representação gráfica dos resultados obtidos, da potência devolvida à rede, entre os dias 9 e 13 de setembro de 2019.	124
Figura 89 – Representação gráfica dos resultados obtidos, através da produção de energia com recurso ao painel solar, entre os dias 10 e 14 de agosto de 2020.	126
Figura 90 – Representação gráfica dos resultados obtidos, através da produção de energia com recurso ao aerogerador, entre os dias 10 e 14 de agosto de 2020.	127
Figura 91 – Representação gráfica dos resultados obtidos, da potência devolvida à rede, entre os dias 10 e 14 de agosto de 2020.	128
Figura 92 – Regime de operação do sistema, relativamente à operação dos sistemas fotovoltaico e eólico, para a semana de 9 a 13 de setembro de 2019.	131
Figura 93 – Regime de operação do sistema, relativamente a operação dos sistemas fotovoltaico e eólico, para a semana de 10 a 14 de agosto de 2020.	132
Figura 94 – Ampliação do gráfico dos resultados, para verificação dos sistemas que estão ligados/ desligados, num determinado período.	133
Figura 95 – Subsistema para cálculo da potência de saída do aerogerador TESUP Master940, em Simulink.	141
Figura 96 - Subsistema para cálculo da potência de saída do aerogerador SunPower E20-435-COM, em Simulink.	141
Figura 97 -Primeira página do <i>datasheet</i> do painel fotovoltaico SunPower E20-435-COM [38].	149

- Figura 98 - Segunda página do *datasheet* do painel fotovoltaico SunPower E20-435-COM [38]. 150
- Figura 99 – Capa do manual de utilizador do aerogerador TESUP Master940 [37]. 151
- Figura 100 – Características técnicas do aerogerador, localizadas na página 8 do manual de utilizador do aerogerador TESUP Master940 [37]. 152

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Calendarização do projeto.	3
Tabela 2 – Principais impactos da utilização de energias renováveis. M€ - Milhões de Euros, Mt – Milhões de toneladas [8].	16
Tabela 3 – Exemplo de um conjunto de regras de um controlador difuso [32].	78
Tabela 4 – Representação das regras de controlo difuso, através de um formato tabular.	79
Tabela 5 – Base de regras [34].	86
Tabela 6 – Entradas e saídas do controlador difuso.	93
Tabela 7 – Informação dos conjuntos difusos das variáveis linguísticas.	94
Tabela 8 – Características técnicas do aerogerador TESUP Master940 [37].	114
Tabela 9 – Características técnicas das pás do aerogerador TESUP Master940 [37].	114
Tabela 10 – Características técnicas do painel fotovoltaico do fabricante SunPower, modelo E20-435-COM [38].	116
Tabela 11 – Potências solar, calculada e difusa, face aos valores de temperatura e irradiância, na semana de 9 a 13 de setembro de 2019.	120
Tabela 12 – Potências eólica, calculada e difusa, face aos valores de temperatura e velocidade do vento, na semana de 9 a 13 de setembro de 2019.	122
Tabela 13 – Potência devolvida à rede, calculada e difusa, na semana de 9 a 13 de setembro de 2019.	123

Tabela 14 – Potências solar, calculada e difusa, face aos valores de temperatura e irradiância, na semana de 10 a 14 de agosto de 2020.	125
Tabela 15 – Potências eólica, calculada e difusa, face aos valores de temperatura e velocidade do vento, na semana de 10 a 14 de agosto de 2020.	126
Tabela 16 – Potência devolvida à rede, calculada e difusa, na semana de 10 a 14 de agosto 2020.	128
Tabela 17 – Resultados das potências médias calculadas e difusas na semana de 9 a 13 de setembro de 2019.	129
Tabela 18 – Resultados de potências calculada e difusa na semana de 10 a 14 de agosto de 2020.	130
Tabela 19 – Tabela da resposta do sistema para a semana de 10 a 14 de agosto de 2020.	146

Acrónimos

APREN – Associação Portuguesa de Energias Renováveis

COA – *Center Of Area*

COG – *Center Of Gravity*

DERs – *Distributed Energy Resources*

FER – Fontes de Energia Renovável

FIFO – *First In First Out*

I&D – Investigação e Desenvolvimento

ISS – *International Space Station*

LOM – *Last of Maxima*

MIMO – *Multiple Input Multiple Output*

MOM – *Middle of Maxima*

MPPT – *Maximum Power Point Tracking*

PD – *Proportional Derivative*

PIB – Produto Interno Bruto

PRE – Produção em Regime Especial

PWM – *Pulse Width Modulation*

SI – Sistema Internacional

SISO – *Single Input Single Output*

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a produção de energia recorrendo a fontes de energia renovável, registou uma elevada taxa de crescimento anual, principalmente a energia solar, que oferece soluções competitivas, amigas do ambiente e de baixo custo. Se os sistemas de produção estiverem localizados próximo das unidades de consumo, o sistema é mais vantajoso, pois as perdas de energia no transporte são praticamente inexistentes. A energia necessária para alimentar uma habitação é relativamente pequena, e pode ser fornecida principalmente por fontes renováveis.

Considerando as duas maiores fontes de energia renovável, a energia solar e a eólica, a captura dessas fontes é um dos focos da indústria do setor energético. Embora pareçam energias infinitas, é de elevada importância garantir a sustentabilidade de um sistema de produção solar ou eólico.

A gestão e controlo da energia produzida pelo sol e pelo vento, deve ser de tal forma eficiente que garanta que a implementação do sistema seja viável.

Neste trabalho, será utilizada a teoria da lógica difusa para a implementação do controlo de um sistema híbrido, solar e eólico, que avaliará dados climatéricos de uma determinada região, e produzirá uma saída resultante da ativação ou não de cada um dos sistemas produtores de energia, mediante a avaliação de um *software* de controlo difuso.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta tese é a criação de um modelo de simulação de um controlador difuso, cuja aplicação é focada no controlo de um sistema de produção de energia, recorrendo às fontes a energia renováveis, nomeadamente o sol e o vento.

Foi elaborada uma aplicação gráfica para a apresentação dos resultados obtidos, utilizando o *software* MATLAB, para a configuração e simulação do controlador difuso. O controlador avalia as condições climatéricas e o consumo da unidade a alimentar, e decidirá se deve ou não colocar em funcionamento cada um dos sistemas de produção de energia, e se a energia produzida é superior à necessária para alimentar a unidade de consumo, injetando nesse caso a energia excedente na rede.

1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Este relatório trata de apontar o trabalho elaborado para a unidade curricular Tese/Dissertação, que é parte integrante do plano curricular do 2º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, do ramo de Automação e Sistemas, do departamento de Engenharia Eletrotécnica, do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

1.3 CALENDARIZAÇÃO

O trabalho descrito obedeceu ao calendário apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Calendarização do projeto.

	set	out	nov	dez	ian	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out
	2019	2019	2019	2019	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Pesquisa de informação sobre o tema proposto														
Escrita do Estado da Arte														
Verificação do funcionamento do módulo de desenvolvimento gráfico do MATLAB														
Introdução ao estudo da biblioteca <i>Fuzzy Logic</i> do MATLAB														
Integração entre a aplicação e a biblioteca <i>Fuzzy Logic</i>														
Desenvolvimento do controlador difuso														
Ajustes do controlador difuso														
Escrita dos resultados obtidos e conclusões														

1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

No capítulo da **Introdução**, o primeiro deste documento, é feita uma apresentação genérica sobre os temas e objetivos práticos deste relatório.

O segundo capítulo, **Produção de Energia com Base em Recursos Renováveis**, aborda as fontes de energia renovável sol e vento, e descreve as ferramentas de captura e conversão da energia solar e eólica em energia elétrica. De seguida, no terceiro capítulo, **Lógica Difusa**, é apresentada a teoria da lógica de controlo.

No quarto capítulo, **Modelo de Simulação de um Controlador Difuso com Base em Recursos Renováveis**, é descrito o percurso de conceção da aplicação de controlo, bem como apresentados os resultados decorrentes da sintonia do controlador desenvolvido.

No quinto capítulo, **Resultados obtidos**, são apresentados os resultados obtidos para o sistema híbrido solar/fotovoltaico. E por fim, no capítulo sexto, **Conclusões**, são tecidas as conclusões da realização do projeto, bem como mencionadas algumas sugestões de melhoramento da aplicação e do controlador projetado.

2. PRODUÇÃO DE ENERGIA COM BASE EM RECURSOS RENOVÁVEIS: PAINÉIS FOTOVOLTAICOS E AEROGERADORES

Atualmente, os sistemas de produção de energia com base em recursos renováveis, como resultado do melhoramento da tecnologia e do aumento do preço do petróleo, estão no centro das atenções. O benefício financeiro da utilização destes recursos leva os governos a investirem na produção de energia renovável. A I&D e o desenvolvimento da tecnologia de produção de energia recorrendo ao sol e ao vento, deve debruçar-se sobre a eficiência,

prever a precisão da saída do sistema, e melhorar essa produção recorrendo a sistemas híbridos que envolvam os recursos solares e eólicos.

Todos os sistemas possuem deficiências, sendo as que têm maior impacto, a incerteza da potência à saída do sistema, bem como a previsão da potência de entrada. Portanto, devido ao efeito de complemento dos sistemas solar e eólico, o sistema híbrido de produção de energia renovável, pode ser um potencial adequado para a produção de energia com alguma certeza. Também, utilizando um sistema de armazenamento de energia, pode ser compensada a falta de energia, e assim renunciar à incerteza das fontes renováveis [1].

2.1 EVOLUÇÃO HISTÓRIA

2.1.1 SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

O aproveitamento da energia eólica pelo Homem remonta à antiguidade. A conversão desta forma de energia primária em energia mecânica, através da utilização dos moinhos de vento, foi realizada desde muito cedo, na história da humanidade, para substituir a força humana ou animal na indústria da fundição e na realização de atividade agrícolas, tais como a moagem de cereais e a bombagem de água para a irrigação e drenagem dos terrenos. Mais recentemente, já no final do século XIX, o rápido crescimento do consumo de eletricidade motivou a aplicação dos princípios básicos de funcionamento dos moinhos de vento, para aproveitamento da energia eólica para a produção de energia elétrica. A primeira turbina eólica, colocada em funcionamento por Charles F. Bush no Inverno de 1887-1888, possuía um rotor com 17 metros de diâmetro constituído por 144 pás de madeira, montado numa torre de 18 metros de altura e sustentado por um tubo metálico central, o qual possibilitava o movimento de rotação de modo a acompanhar o vento predominante. Apesar das dimensões consideráveis, a baixa velocidade de rotação limitava a potência nominal a 12 kW [2].

Um dos primeiros passos no desenvolvimento de turbinas eólicas de grandes dimensões, para a produção de energia elétrica, foi dado na Rússia, em 1931, com a ligação à rede elétrica do aerogerador Balaclava de 100 kW. Anos mais tarde, fruto das atividades de I&D motivadas pela economia dos combustíveis fósseis no decurso da 2ª Guerra Mundial, surgiram novos modelos de aerogeradores. Em 1941 entrou em funcionamento o Smith-Putnam, com um rotor de duas pás de 53,3 metros de diâmetro e 16 toneladas de peso, equipado com um gerador síncrono de 1250 kW de potência, diretamente ligado à rede local em Grandpa's Knob, EUA. Na Europa, a Dinamarca destacou-se com um crescimento significativo do aproveitamento da energia eólica, fruto dos avanços tecnológicos conduzidos pelos cientistas dinamarqueses, primeiro Poul la Cour e, posteriormente, Johannes Juul. A companhia F. L. Smidth foi a pioneira no desenvolvimento de pequenos aerogeradores com potências que rondavam os 45 kW, como as turbinas F. L. Smidth instaladas na ilha de Bogø. Com base no sucesso da operação destes pequenos aerogeradores, Johannes Juul projetou um aerogerador de 200 kW com um rotor de eixo horizontal constituído por 3 pás de 24 metros de diâmetro, o qual foi instalado em 1957 na ilha de Gedser. O aerogerador Gedser constituiu um marco importante na evolução das gerações seguintes de aerogeradores. No entanto, a tecnologia moderna das turbinas eólicas de grandes dimensões surgiu na Alemanha na década de 1950 com a construção do aerogerador com o maior número de inovações da época, as quais persistem ainda hoje na conceção dos modelos atuais. Tratava-se de um aerogerador de 100 kW de potência, equipado com um rotor leve de 34 metros de diâmetro fabricado com materiais compostos, sistema de controlo de passo e torre em forma tubular. Após o choque petrolífero de 1973 as atividades de I&D no aproveitamento da energia eólica como fonte alternativa de energia elétrica, intensificaram-se de forma significativa, nomeadamente na Europa e nos EUA, conduzindo à formação dos primeiros consórcios entre empresas Americanas e Europeias em programas de I&D de turbinas eólicas de grande potência, no início da década de 1980. A indústria da energia eólica registou os primeiros desenvolvimentos a partir dos aerogeradores de potências reduzidas. As primeiras turbinas eólicas comerciais instaladas na Europa e nos EUA, no início da década de 1980, tinham potências nominais situadas na gama de 50 a 100 kW e rotores com diâmetros compreendidos entre 10 e 20 metros. A experiência positiva na operação dos pequenos aerogeradores em conjunto com os resultados dos programas de I&D, potenciou o

crescimento continuado das turbinas eólicas comerciais. O enorme desenvolvimento tecnológico, que passou a ser liderado pela indústria do setor, estimulada por mecanismos institucionais de incentivo, juntamente com o crescimento da produção em massa, tornou possível o desenvolvimento de técnicas de construção de aerogeradores cada vez mais robustas, permitindo o aumento da sua potência nominal unitária. A tecnologia da energia eólica é atualmente uma tecnologia madura e amplamente disseminada. Consequentemente, o aproveitamento da energia eólica apresenta uma escala significativa em termos de geração, eficiência e competitividade, sendo sustentável ao nível do setor elétrico e da indústria. A Figura 1 ilustra a relação do diâmetro do rotor com a potência nominal, ao longo dos anos [2].

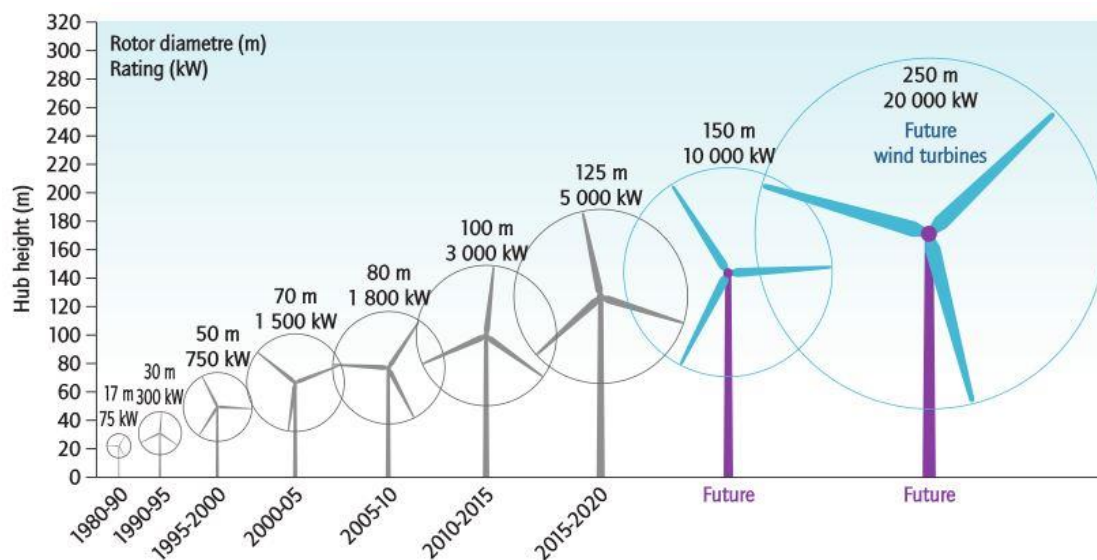


Figura 1 – Evolução do diâmetro do rotor e da capacidade das turbinas eólicas [3].

O aumento da potência nominal dos aerogeradores é traduzido num melhor aproveitamento das infraestruturas elétricas, e de construção civil com reduções graduais e significativas no custo do kW instalado, e consequentemente no custo do kWh gerado. Por outro lado, a redução do número de rotores em movimento diminui o impacto visual [2].

A energia do vento é utilizada há mais de 3000 anos. Até ao início do século XX, a energia do vento era utilizada para providenciar energia mecânica para o bombeamento de água ou moer grãos de cereais. No início da industrialização moderna, a utilização do vento como fonte de energia foi substituída pelos motores de combustão interna, que utilizam energia fóssil, ou pela rede elétrica centralizada, a qual permitia obter uma fonte de energia mais consistente e estável.

No início dos anos 1970, com o primeiro choque no preço do petróleo, o interesse no vento como fonte de energia, voltou a emergir. Nesta altura, contudo, o foco principal foi para a geração de energia elétrica, através da energia do vento, em vez da já conhecida energia mecânica. Desta forma, tornou-se possível fornecer uma fonte de energia confiável e estável, utilizando outras tecnologias de fornecimento de energia - via rede elétrica - como alternativa [2].

As primeiras turbinas eólicas para a produção de energia, tinham sido desenvolvidas no início do século XX. A tecnologia foi melhorada passo a passo, desde o início dos anos 70. No final dos anos 90, a energia eólica reemergiu como um dos recursos de energia sustentável mais importantes. Durante a última década do século XX, a capacidade eólica mundial duplicou, aproximadamente a cada três anos. O custo da eletricidade diminuiu para um sexto, comparativamente ao início dos anos 80.

A tecnologia eólica também evoluiu de forma significativa em novas dimensões. No final de 1989, uma turbina eólica de 300 kW com um rotor de 30 metros de diâmetro, era o sistema mais avançado. Apenas 10 anos mais tarde, turbinas de 2000 kW com o rotor de aproximadamente 80 metros de diâmetro, estavam disponíveis no mercado. Os primeiros projetos demonstrativos de turbinas eólicas de 3 MW, com um rotor de aproximadamente 90 metros de diâmetro, foram instalados antes do virar do século [4]. É possível verificar na Figura 1, a evolução das turbinas eólicas face ao diâmetro do rotor, e potência gerada, ao longo deste século. À atualidade, a maior turbina eólica instalada, pertence ao fabricante *GE Renewable Energy*, a qual possui a capacidade de 12 MW e tem um rotor com 220 metros de diâmetro [5].

2.1.2 SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR

No século XVIII, o físico Horace-Bénédict de Saussure fabricou armadilhas de calor, que eram uma espécie de estufas em miniatura. Horace construiu caixas quentes, as quais consistiam numa caixa de vidro, colocada no interior de outra caixa maior (também de vidro), até um máximo de cinco caixas. Quando expostas à radiação solar, a temperatura da caixa interior podia chegar aos 108°C, a qual era suficiente para aquecer água ou cozinhar comida. Estas caixas podem ser consideradas os primeiros coletores solares.

Em 1839, o físico francês Alexandre-Edmond Becquerel, descobriu o efeito fotovoltaico quando tinha 19 anos. Alexandre observou o efeito de uma célula eletrolítica, que era composta por dois elétrodos de platina, colocados num eletrolítico. Um eletrolítico é uma solução elétrica condutora, a qual neste sistema era composta por cloreto de prata dissolvido numa solução ácida. Desta forma, Alexandre conseguiu observar que a corrente da célula aumentava quando o seu conjunto era exposto à radiação solar [6].

Durante os anos que decorreram entre 1860 e 1870, o inventor francês Augustin Mouchot desenvolveu o motor de vapor a energia solar, usando o primeiro coletor solar de calha parabólica. A motivação de Mouchot foi a sua crença para com a ideia de que as reservas de carvão eram limitadas. Nesse tempo, o carvão era a fonte de energia para os motores a vapor. Contudo, à medida que o preço do carvão descia, o governo francês decidiu que a energia solar era demasiado cara e parou de suportar os fundos para a investigação de Mouchot.

Em 1876, o filósofo inglês William Grylls Adams, em parceria com o seu aluno Richard Evans Day, demonstrou o efeito fotovoltaico, através da união de platina e selénio como semicondutor, no entanto, com um desempenho muito baixo. Sete anos mais tarde, o inventor americano Charles Fritts conseguiu construir um dispositivo fotovoltaico à base da união de ouro e selénio. A eficiência da conservação de energia desse dispositivo era de 1%.

Em 1877, o físico alemão Heinrich Hertz descobriu o efeito fotoelétrico. Neste efeito, são emitidos eletrões de um material que absorveu luz, sendo que apenas se verifica quando a frequência da luz que incide no material, é superior à frequência limiar desse mesmo

material. Em 1905, Albert Einstein publicou um artigo em que explicava o efeito fotoelétrico, assumindo que a energia da luz era carregada em pacotes de energia, que são hoje denominados por fótons.

Em 1918, o químico polaco Jan Czochralski inventou um método para fazer crescer materiais cristalinos de alta qualidade. Esta técnica é muito utilizada nos dias de hoje para fazer crescer silicó mono cristalino, usado em células solares de alta qualidade.

Em 1953, o químico americano Dan Trivich foi o primeiro a efetuar cálculos teóricos sobre o desempenho das células solares para materiais com diferentes *bandgaps*.

O verdadeiro desenvolvimento das células solares, como as conhecemos nos dias de hoje, começou nos laboratórios *Bell Laboratories*, nos Estados Unidos. Em 1954, os cientistas Daryl M. Chapin, Calvin S. Fuller, e Gerald L. Pearson, fabricaram uma célula solar à base de silicó, com uma eficiência de 6% [6].

Na segunda metade dos anos 50, vários laboratórios e empresas começaram a desenvolver células solares à base de silicó, de forma a alimentar satélites em órbita à volta da terra. Por exemplo, o satélite americano *Vanguard 1*, que foi lançado pela marinha norte americana em 1958, foi alimentado por células fotovoltaicas fabricadas pela empresa *Hoffman Electronics*. Em 1962, o laboratório *Bell Telephone Laboratories*, enviou para o espaço o primeiro satélite de telecomunicações alimentado a células fotovoltaicas, e em 1966 a NASA lançou o primeiro observatório astronómico orbital, que foi alimentado por uma matriz de 1 kW, de células fotovoltaicas.

Em 1968, o cientista italiano Giovanni Frância construiu a primeira fábrica de concentração solar, perto de Génova, Itália. A fábrica foi capaz de produzir 1 MW com vapor aquecido a 500° C, a uma pressão de 100 bar.

Em 1970, o físico soviético Zhores Alferov, desenvolveu células fotovoltaicas baseadas numa heterojunção de arseneto de gálio. Em 1976, Dave E. Carlson e Chris R. Wronski desenvolveram os primeiros dispositivos fotovoltaicos de película fina, baseados em silício amorfo, nos laboratórios *RCA Laboratories*. Em 1978, as empresas japonesas SHARP e

Tokyo Electronic Application Laboratory, lançaram para o mercado as primeiras calculadoras alimentadas a energia solar.

Devido à crise do petróleo dos anos 70, a qual levou a uma subida acentuada do preço do petróleo, o interesse público na tecnologia fotovoltaica para aplicações terrestres, foi aumentando. Nesse período, a tecnologia fotovoltaica passou do nicho da aplicação espacial para aplicações terrestres. No final dos anos 70 e 80, várias empresas começaram a desenvolver módulos fotovoltaicos e sistemas para aplicações terrestres. A célula solar continua muito importante na aplicação espacial, como se pode verificar pela Figura 2, que mostra uma matriz de painéis solares da ISS (*International Space Station*) [6].

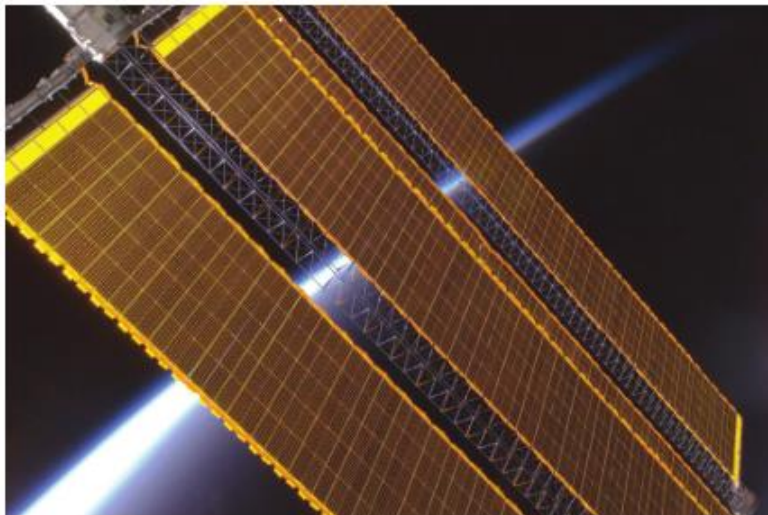


Figura 2 – Matriz de painéis solares da ISS [6].

Em 1980, a primeira célula solar de película fina baseada na junção de sulfeto de cobre/ sulfeto de cádmio, foi demonstrada com uma eficiência de conversão de 10%, na *University of Delaware*. Mais tarde em 1985, foram apresentadas na *University of New South Wales*, na Austrália, células solares de silicó cristalino com uma eficiência acima dos 20%.

No período que decorreu entre 1984 e 1991, a maior central de produção de energia solar térmica do mundo, foi construída no *Mojave Desert*, na Califórnia. Esta central consistia em 9 fábricas com uma potência combinada de 354 MW.

Em 1991, a primeira célula solar sensibilizada por corante de alta eficiência foi apresentada pela *École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, na Suíça, por Michael Grätzel e seus parceiros. A célula solar sensibilizada por corante é uma espécie de sistema fotoeletroquímico, em que um material semicondutor baseado em sensibilizadores moleculares, é colocado entre um foto-ânodo e um eletrólito.

No ano de 1994, o *U.S National Renewable Energy Laboratory* em *Golden, Colorado*, apresentou um concentrador solar baseado em materiais semicondutores III-V. A sua célula era baseada numa união de fosfato de índio-gálio/arseneto de gálio a qual excedia os 30% de eficiência de conversão.

Posteriormente em 1999, a potência fotovoltaica global total instalada passou a barreira do 1 GWp (onde o “p” corresponde ao valor de pico). No início do século XXI, os problemas económicos e ambientais começaram a ficar cada vez mais importantes na discussão pública, os quais levaram ao renovar do interesse público na energia solar. A partir do ano 2000, o mercado fotovoltaico foi transformado num mercado global. A Alemanha tomou a liderança com uma progressiva política tarifária de alimentação, levando a uns enormes mercados e indústrias nacionais.

Desde 2008, o governo chinês investiu seriamente na sua indústria fotovoltaica. Como resultado, a China tornou-se o fabricante dominante de módulos fotovoltaicos. Em 2012, a potência fotovoltaica global total instalada passou a barreira dos 100 GWp [6].

A eletricidade proveniente de fontes de energia renováveis tem vindo a ganhar espaço em várias localizações do globo terrestre. Em 2018, mais de 20% da energia produzida na Austrália, teve origem em sistemas de produção de energia, recorrendo a recursos renováveis. No início de 2019, a produção de energia renovável nos Estados Unidos chegou muito próximo do nível de energia produzida recorrendo a recursos fósseis, tendo duplicado no período de 2008 a 2018. Em Portugal, mais de metade do consumo de energia, derivou da produção de energias renováveis [7].

Em 2018, a eletricidade proveniente da energia do vento e da energia solar, atingiu elevados níveis de penetração em vários países. A produção de energia renovável atingiu

elevados níveis na Dinamarca (51%), Uruguai (36%), Irlanda (29%), Alemanha (26%) e Portugal (24%), Figura 3.

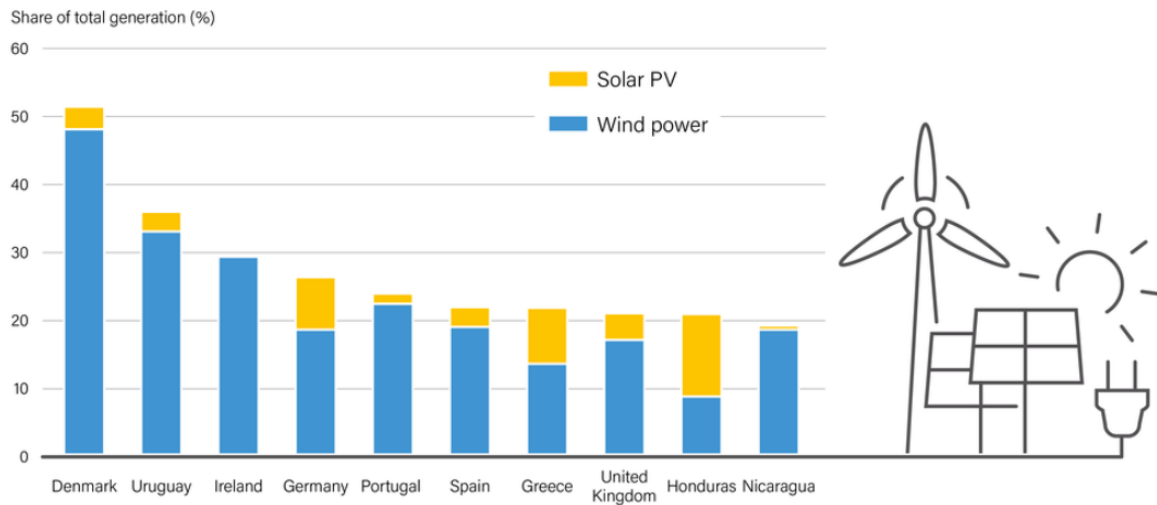


Figura 3 – Produção total de energia renovável dos 10 países com maior percentagem de produção, de acordo com os dados da REN21 [7].

2.1.3 IMPACTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS EM PORTUGAL

O Acordo de Paris, cujo objetivo passa pela transição para uma economia neutra em carbono, auxiliou a que o setor das energias renováveis em Portugal mantivesse um rumo crescente, estimando-se um contributo superior a 80% na produção de eletricidade no país em 2030 [8].

A existência de eletricidade produzida a partir de fontes renováveis, tem impacto em diferentes parcelas das tarifas de eletricidade, destacando-se nesse contexto: o efeito que estas tecnologias têm no preço do mercado grossista diário de eletricidade, pelo facto de apresentarem custo marginal próximo de zero, e os diferenciais de custo associados às tarifas *feed-in* existentes para alguns produtores de energia, quando comparadas com valores de mercado.

De acordo com um estudo realizado pela APREN (Associação Portuguesa de Energias Renováveis), verificou-se que, a PRE (Produção em Regime Especial) renovável tem um custo marginal zero, ou muito próximo de zero. Se não existisse PRE de natureza renovável,

o preço de venda por MWh da eletricidade no mercado diário ibérico teria sido, em média, 24,2 euros superior.

Relativamente ao impacto no PIB (Produto Interno Bruto), no período de 2014 a 2018 a contribuição das FER (Fontes de Energia Renovável) cifrou-se em aproximadamente 3 mil milhões de euros por ano (em média), cerca de 1,7% do PIB. Estima-se que, em 2030, este valor se aproxime dos 11 mil milhões de euros, aproximadamente 4,6% do PIB.

Em 2018, o setor de produção recorrendo a energias renováveis tinha aproximadamente 46 mil colaboradores, gerando um PIB por trabalhador de 70,7 mil euros. Entre 2018 e 2030, as FER deverão gerar um adicional de 114 mil trabalhadores, chegando aos cerca de 160 mil empregos. É previsto ainda que, a contribuição anual para a Segurança Social seja cerca de 116 milhões de euros em 2030.

Em relação à redução das emissões de CO₂, comparativamente às que se teriam verificado se a produção de energia tivesse sido assegurada pelas fontes convencionais fósseis, entre 2014 e 2018, a produção de energia renovável permitiu evitar a emissão de mais de 55 milhões de toneladas de CO₂, bem como poupar mais de 427 milhões de euros em licenças aplicadas a essas emissões. Entre 2018 e 2030, estima-se que as emissões evitadas de CO₂ continuem a aumentar a um ritmo de 6,7% por ano.

Em 2018, evitaram-se aproximadamente 1,2 mil milhões de euros em importações de combustíveis fósseis para a produção de eletricidade, menos 243 milhões de euros que em 2014. Entre 2018 e 2030, estima-se que estas poupanças atribuídas ao setor da dependência energética, ascendam a mais de 27 mil milhões de euros, relativamente a importações evitadas de combustíveis fósseis. Devido aos fracos desenvolvimentos no setor das energias renováveis nos últimos anos, em 2018, a dependência energética ao exterior atingiu quase 77%, contudo espera-se que, em 2030, a dependência em combustíveis fósseis importados seja inferior, atingindo os 65,8%, menos 25,6 pontos percentuais que num cenário sem FER. A Tabela 2, apresenta os principais impactos da utilização de energias renováveis.

Tabela 2 – Principais impactos da utilização de energias renováveis. M€ - Milhões de Euros, Mt – Milhões de toneladas [8].

	2018	2020	2025	2030
Contribuição para o PIB	3306 M€	3860 M€	8015 M€	10959 M€
Emprego Gerado	46790	55008	116796	160974
Emissões de CO₂ evitadas	11,3 Mt	12,9 Mt	19,5 Mt	24,6 Mt
Importações evitadas	1262 M€	1243 M€	2389 M€	3460 M€
Taxa de dependência energética	77,0 %	75,7 %	71,1 %	65,8 %

Relativamente à capacidade instalada para a produção de eletricidade em Portugal, verificou-se um aumento de 12%, de 2014 a 2018, devido a investimentos em novos centros electroprodutores renováveis, Figura 4. Face a esta evolução, verificou-se ainda um decréscimo de 147 MW da capacidade associada a fontes não renováveis. Em 2018, a capacidade instalada em Portugal de centros produtores de eletricidade renovável alcançou os 14059 MW, representa mais 2549 MW face a 2014, Figura 5.

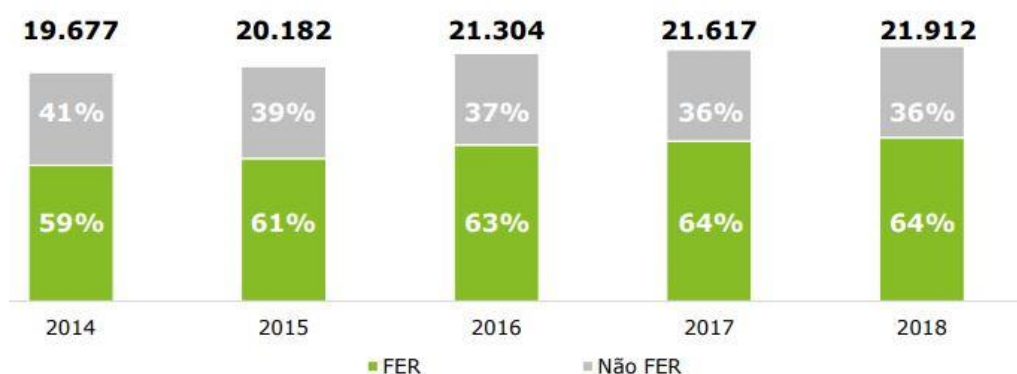


Figura 4 – Evolução da capacidade instalada em Portugal (MW) [8].

A capacidade hídrica aumentou desde 2014, devido ao reforço da potência nas centrais hidroelétricas de Venda Nova III, Salamonde II e à construção dos aproveitamentos hidroelétricos de Foz Tua, Baixo Sabor e de Ribeiradio – Ermida. Relativamente à evolução eólica, a capacidade sofreu uma estagnação, e a energia solar apresentou um aumento, no entanto, a sua utilização é ainda bastante reduzida, tendo em conta as metas para 2030.

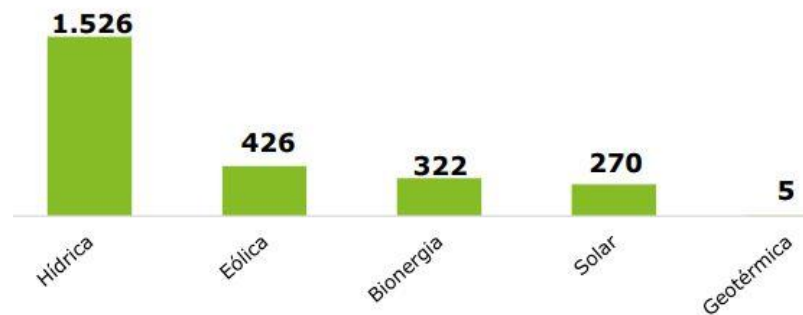


Figura 5 – Aumento da capacidade instalada FER em Portugal, entre 2014 e 2018 (MW) [8].

2.2 TECNOLOGIA DAS TURBINAS EÓLICAS

2.2.1 COMPONENTES DAS TURBINAS EÓLICAS

Uma turbina eólica é uma máquina que utiliza a potência do vento para gerar eletricidade, convertendo a energia cinética do vento em energia mecânica. É uma estrutura complexa que é fabricada com um amplo conjunto de componentes mecânicos, elétricos e de construção civil. Um sistema eólico típico inclui rotores, o conjunto das pás, a *nacelle*, o mecanismo de ângulo das pás, o gerador, sistemas de transmissão, torre, e em alguns tipos de aerogeradores, uma fundação, Figura 6 [9].

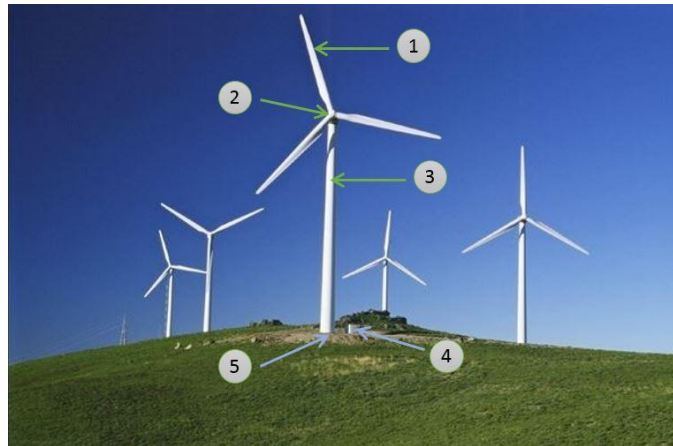


Figura 6 – Visão global de uma turbina eólica. (1) Pás do rotor, (2) *Nacelle*, (3) Torre, (4) Transformador, (5) Fundação [10].

2.2.1.1 TORRE

O objetivo da torre é suportar a turbina eólica. A torre suporta os pesos da *nacelle*, do rotor, do mecanismo de ângulo das pás, e todos os componentes elétricos. Esta deve também absorver a enorme vibração criada pelo vento, e transferir essa vibração para a fundação. Geralmente, são utilizadas secções tubulares de cimento ou aço pré-fabricado. As torres de cimento são suficientemente fortes, mas têm um custo acrescido, enquanto que as torres de aço são aplicáveis para construções de uma altura superior. A escolha do tipo de torre depende de vários fatores, que variam com a localização da instalação. O alinhamento vertical é primordial para a construção das turbinas eólicas, mas é permitido um desvio de até um grau. A Figura 7 apresenta vários tipos de torres de turbinas eólicas [9].



Figura 7 – Vários tipos de torres de turbinas eólicas [9].

2.2.1.2 FUNDAÇÃO

O objetivo da fundação é transferir, de forma segura, as cargas para o solo e assegurar que a estabilidade da turbina eólica se encontra dentro dos desvios e inclinações permitidos. A fundação suporta uma diferente quantidade de cargas incluindo cargas mortas, por vibração, e cargas aplicadas pelo vento. A carga morta que atua na turbina eólica é maioritariamente o peso da estrutura, incluindo a torre, os rotores, a *nacelle* e os componentes elétricos. As cargas adicionais, em conjunto, causam enormes momentos de inclinação na fundação. A Figura 8 mostra a comum maioria das fundações utilizadas na indústria eólica.

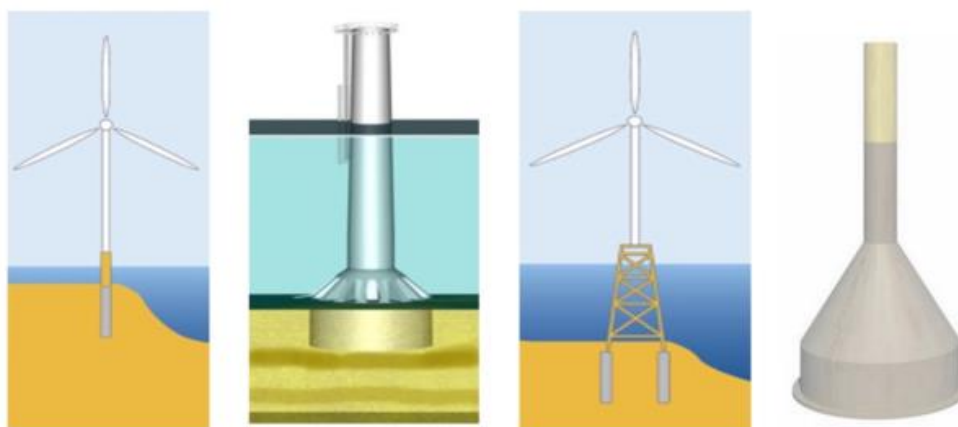


Figura 8 – Vários tipos de fundações para turbinas eólicas [9].

As fundações de tipo gravidade são fundações constituídas por betão armado, e utilizadas maioritariamente em instalações *onshore*, que correspondem a instalações em terra firme. Este tipo de fundação é escolhido para terrenos duros, são instalados a uma profundidade de 2 a 3 metros abaixo da superfície do solo, e podem possuir uma forma retangular, circular ou octogonal.

A estrutura *jacket* é uma estrutura de aço de quatro pilares, que estão ligados entre si, através de aço soldado à sua superfície. Normalmente, esta estrutura é utilizada para aplicações *offshore*, isto é, para instalações em alto mar. As estruturas do tipo *jacket* são

pesadas, e desenvolvidas para ficarem submersas, onde a profundidade da água atinge os 20 a 50 metros. Um exemplo de uma estrutura deste tipo é apresentado na Figura 9.



Figura 9 – Fundação do tipo *jacket*, para turbinas *offshore* [9].

Além dos tipos de fundação mencionados anteriormente, existem ainda fundações do tipo balde de sucção, monopilar, tripilar e *tripod*. As fundações do tipo balde de sucção são normalmente utilizadas em instalações *offshore*. Este tipo de fundação consiste num balde invertido, fabricado em aço, de diâmetro até 10 metros, como pode ser verificado na Figura 10. Esta fundação é submersa no oceano, e a água é bombeada para fora do balde para diminuir a pressão no seu interior. A pressão negativa resultante, e o peso da fundação, levam a que esta se enterre no solo que se encontra no fundo do oceano. Este tipo de estrutura é aplicável em águas profundas e turbinas de grande dimensão [9].



Figura 10 – Estrutura tipo balde de sucção [9].

A fundação do tipo monopilar é fabricada com tubo de aço oco de forma cilíndrica, com diâmetro até 12 metros, e espessura de 150 milímetros. Este é o tipo de estrutura mais comum em instalações *offshore*. Uma fundação tripilar, consiste numa estrutura de três pernas, ligadas a um monopilar que se encontra na estrutura superior, conforme apresentado na Figura 11. É construída com secções de tubo cilíndrico em aço, e aplicável a profundidades de 25 a 40 metros. A grande vantagem consiste nos ajustes da largura e profundidade de penetração do pilar, dependendo das condições geológicas do local.

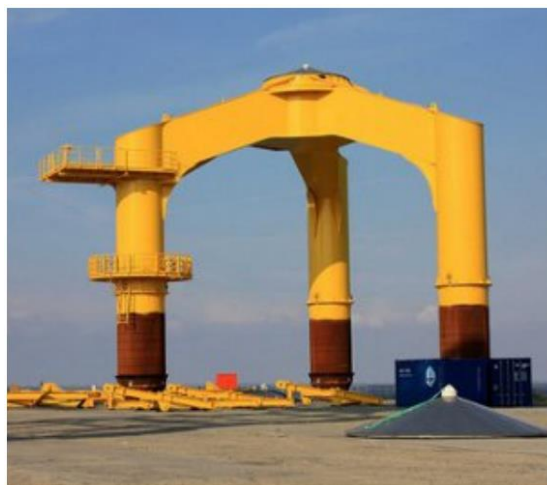


Figura 11 – Estrutura tripilar [9].

Além das estruturas monopilar e tripilar, existe ainda a estrutura do tipo *tripod*. Esta estrutura é constituída por três pilares e está ancorada ao solo do oceano. Esta ancoragem fornece uma boa estabilidade e rigidez contra cargas laterais. Na Figura 12 pode ser verificado o aspeto desta estrutura, bem como a identificação dos componentes que a constituem [9].

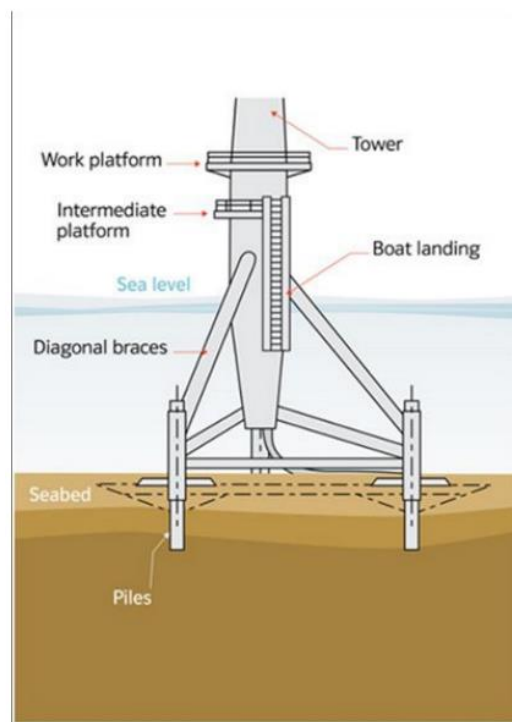


Figura 12 – Estrutura do tipo tripod [9].

2.2.1.3 OUTROS COMPONENTES DAS TURBINAS EÓLICAS

A *nacelle* está instalada no topo da torre, e fornece o abrigo aos componentes mecânicos e elétricos, que são constituídos pelo gerador, caixa de velocidades, veios de velocidade, mecanismo de ângulo das pás e sistema de travagem, Figura 13. As *nacelle* das turbinas eólicas modernas são fabricadas com uma zona reservada à aterragem de helicópteros, para efeitos de manutenção e outros serviços.

Quase todas as turbinas eólicas atuais, estão equipadas com um anemómetro e com uma palheta de vento, que são usados para medir a velocidade e a direção do vento. A turbina eólica alinha-se automaticamente com a direção do vento, utilizando a informação proveniente destes dois sensores. Quando o vento atinge o *cut-of speed*, é aplicada uma travagem ao rotor, através de um sistema mecânico, elétrico ou hidráulico, de forma a parar a rotação da turbina eólica. A caixa de velocidades liga o veio de baixa velocidade ao veio de alta velocidade, o que aumenta a velocidade de rotação até ao nível pretendido pelo gerador, para produzir energia elétrica. A caixa de velocidades é o componente mecânico de maior valor monetário que constitui a turbina eólica. O gerador utiliza a energia rotacional proveniente do veio de alta velocidade para produzir energia elétrica. O veio de baixa velocidade é o elemento de comunicação entre o rotor e a caixa de velocidades, enquanto que o veio de alta velocidade atua no gerador. Quando as pás do rotor começam a girar, o veio de baixa rotação atua sobre a caixa de velocidades, que por sua vez atua sobre o veio de alta velocidade. O mecanismo de ângulo das pás é utilizado para orientar as pás da turbina contra a direção do vento. A direção da turbina é controlada através da informação proveniente da palheta do vento, sendo que este sistema é acionado através de motores elétricos. A função de rotação das pás, serve para controlar a velocidade do rotor, que permite ainda parar o rotor, quando os ventos forem demasiado elevados, ou demasiado baixos para produzir energia [9].

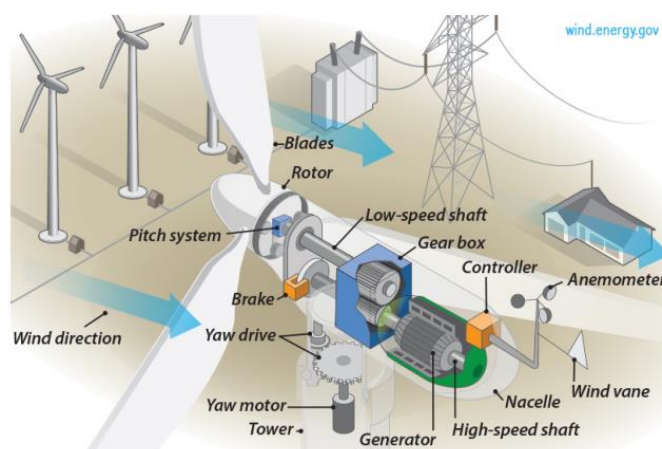


Figura 13 – Componentes do aerogerador [9].

2.3 TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS

2.3.1 DE EIXO VERTICAL

As turbinas de eixo vertical estão mais aproximadas do solo e são ideais para a captura de vento de baixa velocidade, para aplicação residencial ou em zonas urbanas. Uma vez que o rotor gira sobre o eixo vertical, as pás são capazes de capturar o vento proveniente de qualquer direção e, além disso, conseguem gerar corrente elétrica sem o auxílio do mecanismo de ângulo das pás. Estas turbinas, em comparação com as de eixo horizontal, produzem menos ruído sonoro, o que as torna ideais para a aplicação residencial. Tipicamente, as turbinas de eixo vertical criam um menor impacto nos custos de manutenção. Existem apenas dois tipos de turbinas de eixo vertical: Darrieus e Savonius.

As turbinas Darrieus utilizam um conceito aerofólio para conseguir a rotação das suas pás sobre o rotor vertical. Isto permite que a turbina Darrieus tenha uma velocidade de rotação praticamente ilimitada. Contudo, necessita do auxílio de um motor elétrico de baixa potência, para iniciar o arranque da rotação. As turbinas Darrieus originais possuíam a forma apresentada na Figura 14. A caixa de velocidades encontra-se instalada na base da turbina, para simplificar o acesso em caso de manutenção. Devido à sua estrutura relativamente instável, alguns dos primeiros modelos instalados sofreram danos após atingirem uma rotação de aproximadamente 60 rotações por minuto, bastante acima da especificação de 40 rotações por minuto, as quais causam vibrações instáveis [11].



Figura 14 – Turbina Darrieus [11].

A geração seguinte de turbinas Darrieus possui um rotor de forma em "H", como pode ser verificado na Figura 15. A turbina original de rotor em "H" possuía apenas duas pás, no entanto, atualmente, o desenho mais comum é de três pás. A título de exemplo, uma turbina da marca UrWind O2, que possui uma potência nominal de 1,7 kW, e altura aproximada entre os 8 e os 19 metros, pode gerar entre 2000 a 4000 kWh/ ano.



Figura 15 – Turbina Darrieus UrWind O2 de rotor "H" [11].

A maioria das turbinas eólicas do tipo Darrieus possuem uma forma helicoidal para ajudar a suavizar o vento, e diminuir as vibrações para aumentar a eficiência, diminuir o desgaste, e reduzir os níveis de ruído sonoro. O ângulo de ataque do vento sobre as pás deve estar compreendido entre os 0 e os 20 graus, para manter o fluxo de vento laminar, pois a mudança entre ventos laminar e turbulento causaria vibrações e, portanto, instabilidades. No entanto, para se obter o melhor ângulo de ataque, as pás devem girar a uma velocidade suficiente, e é por isso que a maioria das turbinas eólicas Darrieus não possuem arranque próprio.

Outro tipo de turbina vertical é denominado por Savonius, que utilizam um conceito simples, onde as pás cortam o vento, e utilizam a força de arrasto para fazer rodar o rotor, como demonstrado na Figura 16.

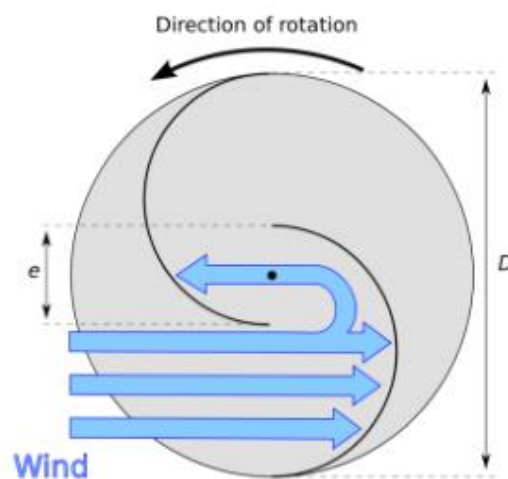


Figura 16 – Princípio de funcionamento de um rotor de uma turbina Savonius [11].

Uma vez que o rotor é impulsionado pela força de arrasto, a sua velocidade máxima é igual à velocidade do vento. Este tipo de turbina (Figura 17) é pequena e silenciosa, sendo ideal para aplicações residenciais. A tecnologia das turbinas de eixo vertical tem evoluído ao longo dos anos. Existem inúmeros projetos adequados para qualquer tipo de área, desde que a potência do vento assim o permita.



Figura 17 – Exemplo de uma turbina eólica do tipo Savonius [11].

2.3.2 DE EIXO HORIZONTAL

Ao contrário das turbinas de eixo vertical, a maioria das turbinas de eixo horizontal não são aplicáveis para aplicações residenciais. Para este tipo de turbinas, a velocidade do vento é o fator mais importante para a produção de energia elétrica. As turbinas de eixo horizontal que são utilizadas para efeitos comerciais de produção de energia, são extremamente altas, de forma a poderem capturar as correntes de ar de maior velocidade. O diâmetro do rotor possui também um componente importante na quantidade de energia produzida. Quando o vento passa pelas pás, as correntes de ar laminado tornam-se turbulentas, sendo que esta turbulência diminui a eficiência das turbinas de eixo horizontal consequentes. Para garantia da sua eficiência, o espaço mínimo requerido entre turbinas deve ser de 15 vezes o diâmetro do rotor. A maioria dos fabricantes de turbinas eólicas utilizam o modelo de turbinas com um rotor de três pás, conforme pode ser verificado na Figura 18.



Figura 18 – Parque eólico em localização desconhecida [7].

2.4 POTÊNCIA DO VENTO

A potência contida no vento é representada por " P " e a potência que pode ser extraída da potência do vento é denominada por " P_a ", e podem ser calculadas através das seguintes equações:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (2.1)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times C_p \quad (2.2)$$

onde,

P - Potência que está contida no vento (em *watts*),

ρ - Densidade do ar - varia com a temperatura e com a altitude,

A - Área varrida pelo rotor (m^2),

v - Velocidade do vento (m/s),

P_a - Potência que pode ser extraída de uma turbina eólica (em *watts*),

C_p - Coeficiente de potência devido a perdas.

O coeficiente de potência (C_p) é a eficiência medida de uma determinada turbina eólica. Normalmente, este valor é determinado para várias velocidades do vento, e indicado pelo fabricante da turbina. Geralmente, este coeficiente contempla todas as perdas combinadas, sejam elas perdas dos componentes mecânicos, aerodinâmica ou elétrica. O físico alemão Albert Betz concluiu em 1919 que nenhuma turbina eólica poderia converter mais do que 59,3% da energia cinética do vento, o que corresponde à Lei de Betz. Note-se também que o limite de Betz é realmente o valor máximo teórico a partir do qual nenhuma turbina, na prática, poderá operar. Esses valores, na realidade rondam entre 35% e 40% [9].

2.5 TECNOLOGIA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

2.5.1 O EFEITO FOTOVOLTAICO

A célula solar é o primeiro componente ativo de um sistema de energia solar. É suplementada por outros subsistemas para condicionar e transportar a energia, e por vezes, armazená-la. Uma célula solar produz eletricidade quando os fótons da luz passam energia para os elétrons (cargas negativas) no seu material semicondutor, permitindo que estes fiquem livres. O átomo residual é então deixado com um valor líquido positivo. Devido à forma como as células são processadas, a carga negativa é atraída para uma superfície, enquanto que a positiva é atraída para a outra, como é possível verificar pela Figura 19. As grelhas condutivas nas superfícies frontal e traseira da célula solar, reúnem essas cargas positiva e negativa. Esses contactos estão depois ligados a fios para conduzir no sentido da corrente contínua, desde a célula até à alimentação do circuito externo. O efeito fotovoltaico acontece, enquanto houver luz do dia, mesmo em dias em que estão presentes nuvens. As células não necessitam de calor, e trabalham de forma mais eficiente e a temperaturas mais baixas [12].

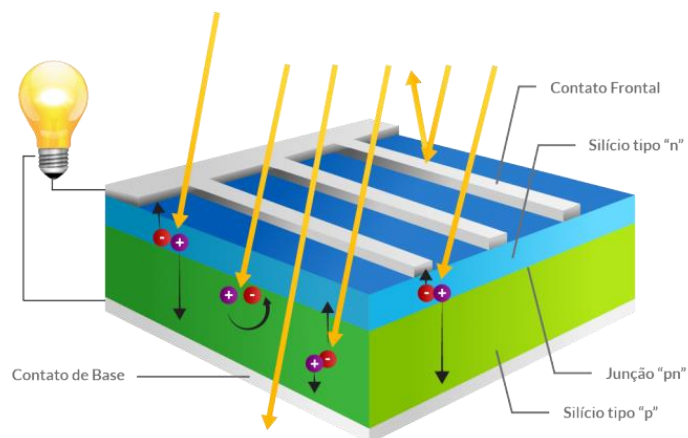


Figura 19 – Efeito fotovoltaico numa célula solar [13].

2.5.2 OPERAÇÃO FOTOVOLTAICA CARACTERÍSTICA

Na Figura 20, é possível verificar uma curva característica típica de corrente-tensão (I-V), onde estão apresentadas a corrente e a tensão que podem ser fornecidas por uma célula solar, a diferentes níveis de intensidade de luz. A célula pode operar em cada ponto da linha e a sua saída depende da carga do circuito externo ao qual a célula está conectada.

Por exemplo, no extremo direito do gráfico, podemos encontrar o ponto da tensão em circuito aberto (*VOC -voltage open-circuit*), que é o potencial que existe entre os dois contactos da célula quando estes não estão ligados a um circuito externo, e portanto, não estão a fornecer corrente.

Na zona esquerda do gráfico, podemos verificar a corrente de curto-circuito (*ISC short-circuit current*), que flui se os contactos da célula estiverem ligados diretamente um ao outro, isto é, a uma tensão igual a zero volts. As células fotovoltaicas podem sofrer curto-circuito, sem sofrerem danos.

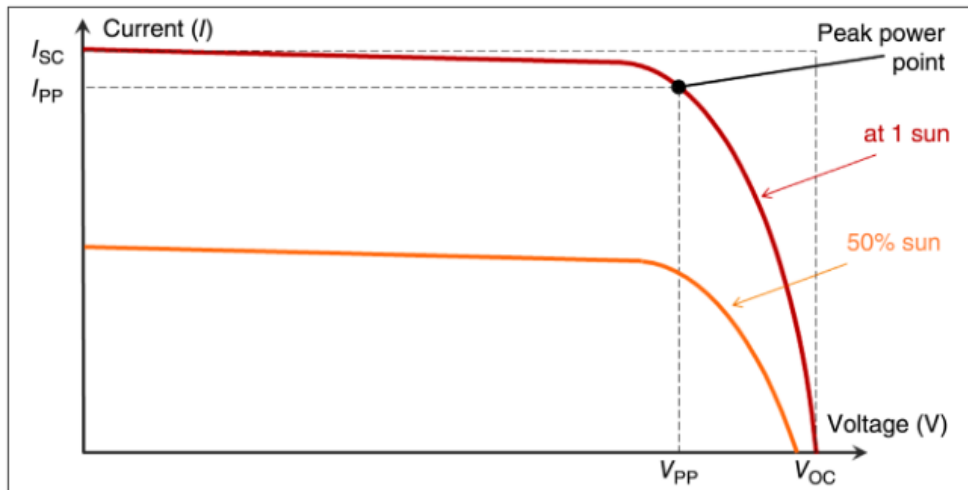


Figura 20 – Curva Corrente-Tensão característica típica de uma célula solar, a diferentes níveis de luz [12].

O ponto onde se obtém a potência máxima é denominado por “Ponto de Máxima Potência”. A saída neste ponto, conhecido como "Pico Watt" (W_p - *watts peak*), é o parâmetro chave para a classificação dos módulos de células. A capacidade que um módulo, ou sistema fotovoltaico, avaliado em W_p (ou kW_p , MW_p etc.), é uma classificação da potência que este pode fornecer, quando estiver a operar no ponto de máxima potência. O ponto da curva característica em que a célula vai operar, vai depender do circuito externo ao qual está ligado. Esse circuito também possui uma curva característica I-V, e a rede vai operar onde as duas curvas se encontram. Por exemplo, uma bateria num determinado estado de carga opera a uma tensão fixa, isto é, uma linha vertical na curva característica. A corrente com que a célula solar vai carregar a bateria, varia com a intensidade da luz à qual a célula está exposta [12].

2.6 SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E SEUS CONSTITUINTES

2.6.1 CÉLULAS SOLARES

As células solares são o núcleo de um sistema fotovoltaico, e são responsáveis por converter a luz incidente em energia elétrica. A maioria das células solares são feitas de silicógeno cristalino, como se pode verificar na Figura 21. As células solares possuem o mesmo princípio de funcionamento, no entanto, as suas características podem variar com os materiais que as constituem. As células solares tornam-se cativas eletricamente quando expostas à luz solar. A tensão que cada célula fornece, é em função da propriedade dos materiais que as constituem, tipicamente na ordem dos 0,5 volts. As células solares podem ser ligadas em série ou em paralelo [12].



Figura 21 — Célula solar de silicógeno monocristalino [12].

2.6.2 MÓDULOS SOLARES

As células solares são componentes elétricos cativos, que necessitam de proteção para prolongar o seu tempo de vida. Normalmente, estão encapsuladas em pacotes, conhecidos como módulos solares. Os módulos solares evoluíram ao longo do tempo, mas a

configuração mais comum, consiste numa cobertura frontal de vidro temperado, e uma membrana implantada na parte traseira do grupo de células, de forma a protegê-lo das ações do tempo. Alguns tipos de células de película fina são implantados diretamente na cobertura de vidro. Além das proteções mecânicas, os módulos solares permitem que um determinado número de células sejam ligadas, de forma a fornecer uma combinação adequada de tensão e de corrente. Devido aos sistemas mais recentes serem desenhados para carregar baterias com uma carga nominal de 12 volts, os fabricantes de módulos solares, rapidamente migraram para produtos *standard*, que consistiam em 36 células conectadas em série, idêntico ao apresentado na Figura 22. Com este número de células ligadas em série, obtemos uma tensão nominal de aproximadamente 18 volts que, depois de algumas perdas por temperatura e resistência dos cabos, se consegue obter aproximadamente 14 volts, o que permite carregar baterias de chumbo-acido. Tipicamente, os módulos solares possuem ainda uma estrutura para suportar o módulo solar, uma caixa de conexão, e um cabo de saída [12].



Figura 22 – Exemplo de um módulo solar da marca Renogy [14].

2.6.3 ESTRUTURAS EM MATRIZ E SEGUIDORES

Os grupos de módulos solares são normalmente montados em estruturas para otimizar a sua orientação para a radiação solar, semelhante ao exemplo apresentado na Figura 23.

No início da era dos painéis fotovoltaicos, estes eram colocados numa estrutura fixa ao solo, orientada para o sul, quando localizados no hemisfério norte, e para norte, quando colocados no hemisfério sul. Este desenho do sistema aponta ao cálculo do ângulo de inclinação ótimo, baseado na radiação solar local e na saída pretendida.



Figura 23 – Módulos solares numa típica montagem de solo [15].

Em sistemas de CC (corrente contínua), é necessário um ângulo mais acentuado, de forma a maximizar a saída durante o período de Inverno, dando assim um desempenho mais uniforme ao longo do ano. Os sistemas ligados à rede, por outro lado, são dispostos com um ângulo para maximizar a produção no verão e, assim, a produção de energia em geral.

Além dos sistemas fixos, existem os sistemas que seguem a radiação solar, consoante a sua orientação. Um exemplo deste sistema pode ser consultado na Figura 24 [12].



Figura 24 – Painéis fotovoltaicos com sistema de seguimento solar [16].

2.6.4 CONTROLADOR DE CARGA PWM

O controlador de carga PWM (*Pulse Width Modulation*) pode ser colocado em alternativa ao controlador de carga MTTP (*Maximum Power Point Tracking*). Este dispositivo atua como um interruptor entre o módulo de painéis solares e o banco de baterias que, quando fechado, permite que a corrente flua para as baterias. Quando a tensão das baterias atinge o ponto de regulação, o algoritmo do PWM reduz lentamente a corrente de carga para evitar o sobreaquecimento das baterias. Durante a carga, o dispositivo envia a máxima potência possível para carregar as baterias, no menor espaço de tempo possível. A tensão dos módulos dos painéis solares é ajustada de forma a aproximar-se da tensão das baterias. Assumindo uma bateria descarregada, a tensão inicial de carga vai ser aproximadamente de 13 V, e assumindo uma perda de 0,5 V nos cabos e no controlador, a tensão de saída do módulo de painéis, vai ser de aproximadamente 13,5 V. A tensão vai aumentar lentamente dependendo das condições onde o sistema está instalado, e da qualidade do próprio sistema.

2.6.5 CONTROLADOR DE CARGA MPPT

O MPPT é um controlador de carga, que compensa as alterações da característica Tensão-Corrente de uma célula solar. Este dispositivo, é frequentemente colocado à saída do conjunto de painéis solares, e permite a conexão aos terminais positivo e negativo dos painéis, bem como a conexão a um banco de baterias. Alguns modelos possuem bornes para ligação da carga, seja um inversor, ou um componente que opere à tensão nominal de saída do dispositivo. O MPPT permite que os painéis solares forneçam tensão e corrente variáveis, fazendo com que mais potência seja encaminhada para as baterias. Esta operação é conseguida devido à constante monitorização da tensão e da corrente à saída do modulo de painéis solares, determinando o ponto de operação que vai fornecer a potência máxima disponível para as baterias. Assim, o MPPT é um transformador DC-DC, que consegue transformar potência a uma tensão elevada, em potência a uma tensão mais baixa, Figura 25. A potência não se altera, portanto, se a tensão de saída é inferior à tensão de entrada, a corrente de saída vai ser superior a corrente de entrada, de forma a garantir a fórmula $P = V \times I$.

Comparativamente ao PWM, o MPPT é 30% a 40% mais eficiente, quando em funcionamento a baixas temperaturas. Se maximizar a capacidade de carga for o único fator a considerar na escolha de um controlador de carga, então deve optar-se pelo MPPT, no entanto, as tecnologias utilizadas pelo PWM e MPPT são distintas, cada uma com as suas vantagens e desvantagens.



Figura 25 – Controlador de carga MPPT do fabricante EPEVER.

Os sistemas MPPT são considerados os sistemas mais populares em qualquer sistema fotovoltaico.

A quantidade de energia obtida pelo sistema fotovoltaico depende de vários fatores, incluído o nível de irradiância, temperatura e sombras parciais. Assim, os algoritmos utilizados por estes controladores, devem considerar as alterações destes fatores. A curva característica, além de apresentar os parâmetros V_{OC} , I_{SC} , bem como a tensão, corrente e potência da célula no ponto de maior potência (V_{MPP} , I_{MPP} e P_{MPP} , respectivamente), deve considerar os parâmetros *fill factor* (FF) e a eficiência (η). O parâmetro FF mede a qualidade da matriz de painéis fotovoltaicos, e é calculado da seguinte forma [17]:

$$FF = \frac{P_{MAX}}{P_T} = \frac{I_{MP} V_{MP}}{I_{SC} V_{OC}} \quad (2.3)$$

A eficiência de uma célula fotovoltaica, η , é definida como o rácio da potência elétrica de saída sobre a potência da radiação solar que incide sobre a célula, no ponto de maior potência e condições de iluminação *standard* [17].

2.6.6 INVERSORES

Os sistemas de produção de energia fotovoltaica, que são desenhados para fornecer potência na forma de CA (corrente alternada), necessitam transformar a corrente contínua produzida pelas matrizes de painéis fotovoltaicos, em corrente alternada. Nos casos em que estes sistemas estão ligados à rede elétrica existente, é necessário que o inversor estabeleça a sincronização entre a corrente produzida pelo sistema e a rede.

2.7 MICRO-REDE DE PRODUÇÃO DE ENERGIA E SEUS COMPONENTES

As micro-redes podem ser consideradas como redes de potência de pequena escala, que consistem em DERs (*Distributed Energy Resources*), cargas e controladores. Uma das grandes vantagens das micro-redes é que podem operar em série com a rede de energia elétrica ou como fontes independentes, que podem gerar, distribuir e regular a potência fornecida aos consumidores locais. Adicionalmente, a maioria dos sistemas de energias renováveis, fornecem a rede com a potência necessária, que pode ser diretamente utilizada ou armazenada em sistemas de armazenamento de energia, o que melhora o desempenho geral de uma micro-rede. Desenvolver um sistema de gestão e controlo adequado para uma micro-rede não é uma tarefa fácil. Existem numerosos desafios para garantir um sistema eficiente e de operação fiável. As micro-redes são utilizadas para abastecer diferentes tipos de carga, quer seja residencial, comercial, ou industrial, dependendo da sua prioridade [18].

2.7.1 DERs

As DERs são unidades de geração de energia, que neste caso, correspondem às fontes de energia renovável. A energia resultante destas fontes pode ser do tipo CC, como as células fotovoltaicas, ou CA, como as turbinas eólicas.

2.7.2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO

As diferentes fontes de energia renovável abastecem a rede com a potência necessária, que pode ser armazenada através de baterias. Estes sistemas de armazenamento servem de fonte de energia alternativa à fonte principal, mas também melhoram o desempenho e a estabilidade de uma micro-rede, permitindo aos DERs trabalharem com uma saída constante, enquanto fornecem a potência necessária à flutuação da carga.

2.7.3 ESTRUTURA DE UMA MICRO-REDE

A Figura 26 mostra um exemplo de uma estrutura de uma micro-rede, que contém os DERs, geradores suficientemente pequenos quando comparados com estações de produção centrais. Estas unidades podem trabalhar sobre duas formas diferentes: integradas com a rede principal ou em modo ilha. O modo de integração das micro-redes com a rede principal é feito através de uma única ligação, normalmente utilizando um contactor eletromecânico. O modo ilha é conseguido separando a micro-rede da rede principal, trabalhando de forma independente para alimentar cargas locais.

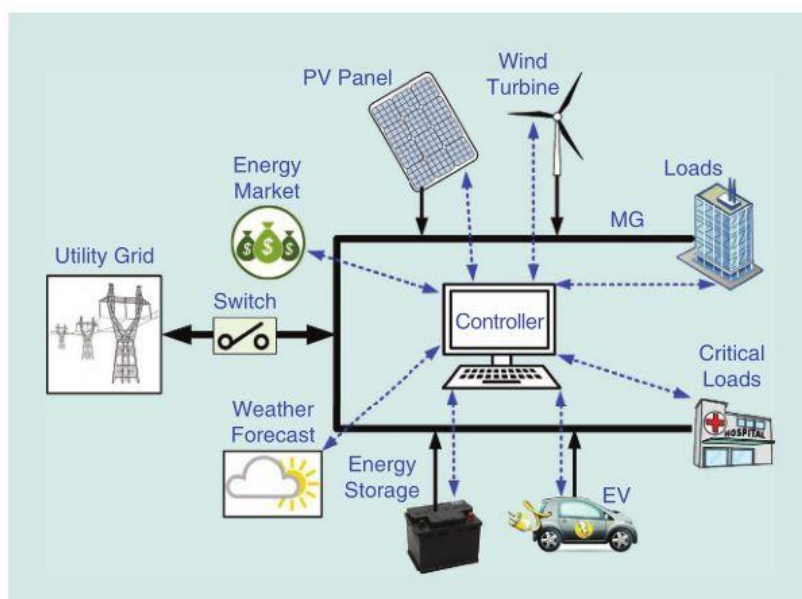


Figura 26 – Estrutura exemplo de uma micro-rede [18].

2.8 POTENCIA GERADA POR UM PAINEL FOTOVOLTAICO

A potência de saída de um modelo fotovoltaico depende da irradiância solar e da temperatura ambiente do local da instalação. Para calcular a potência de saída de um painel, é necessário utilizar a informação facultada pelo fabricante, sobre as características do painel. A potência máxima de saída, a uma irradiância solar s , pode ser calculada recorrendo às seguintes formulas:

$$T_{cy} = T_A + s \left(\frac{N_{OT} - 20}{0.8} \right) \quad (2.4)$$

$$I_y = s [I_{sc} + K_i (T_{cy} - 25)] \quad (2.5)$$

$$V_y = V_{oc} - K_v \times T_{cy} \quad (2.6)$$

$$FF = \frac{I_{MP} V_{MP}}{I_{SC} V_{OC}} \quad (2.7)$$

$$P_{PV_o}(s) = N \times FF \times V_y \times I_y \quad (2.8)$$

onde, N representa o número de módulos, T_{cy} e T_A representam as temperaturas do módulo fotovoltaico e da temperatura ambiente, respetivamente, enquanto que I_y e V_y representam a corrente e tensão geradas pelo módulo. Os parâmetros I_{sc} e V_{oc} representam a corrente em curto-circuito (em Amperes) e a tensão em circuito aberto (em Volt). As variáveis K_i e K_v representam os coeficientes de temperatura aplicados à corrente e à tensão (Ampere/°C e Volt/°C), respetivamente. O parâmetro N_{OT} representa a temperatura nominal de operação da célula fotovoltaica, em graus centígrados (°C), e P_{PV_o} representa a potência de saída de um módulo fotovoltaico, a uma irradiância s [19].

3. LÓGICA DIFUSA

Essencialmente, o conceito de lógica difusa aponta para situações em que a fonte de imprecisão não é uma variável aleatória ou um processo estocástico, mas uma classe, ou classes, que não possuem limites nitidamente definidos [20]. Em termos mais específicos, o que é central na lógica difusa é que, ao contrário dos sistemas de lógica clássica, esta aponta para a modelação de modos de raciocínio imprecisos, que desempenham um papel essencial na habilidade notável do ser humano, para tomar decisões racionais num ambiente de incerteza e imprecisão. Esta habilidade depende, por sua vez, da habilidade de inferir uma resposta aproximada a uma questão baseada numa reserva de conhecimento que é inexato, incompleto, ou não é totalmente confiável. Por exemplo:

(1) Normalmente demora uma hora para viajar de carro de *Berkeley* a *Stanford*, e cerca de meia hora para viajar de carro de *Stanford* a *San José*. Quanto tempo demoraria para viajar de carro de *Berkley* a *San Jose*, passando por *Stanford*?;

(2) A maioria das pessoas que vivem em *Belvedere* possuem salários altos. É provável que a *Mary* viva em *Belvedere*. O que pode ser dito sobre o salário da *Mary*?;

(3) A magreza é atraente. A *Carol* é magra. A *Carol* é atraente?;

(4) O *Brian* é mais alto que a maioria dos seus amigos. Quão alto é o *Brian*? [21].

3.1 NOTA HISTÓRICA

Os créditos de ter fundado a teoria dos conjuntos difusos (e "inventado" o termo "*fuzzy set*") são atribuídos ao professor da Universidade de Berkley, L. A. Zadeh. L.A. Zadeh nasceu em 1921, em Baku, na altura, a capital do Azerbaijão Soviético. Mais tarde, foi para o Irão com os seus pais (eles eram cidadãos do Irão), onde viveram até 1944. Em 1944, Zadeh foi estudar para os Estados Unidos. Em 1951, foi-lhe atribuído o grau de doutor em Engenharia Eletrotécnica, e em 1963 foi eleito como diretor do departamento de Engenharia Eletrotécnica, da Universidade de Berkeley. Em 1956, ele conheceu S. Kleene (1909-1994), um lógico excepcional, e autor do famoso "*Introduction to metamathematics*". É então que surge em Zadeh a ideia de utilizar uma lógica de muitos valores, a fim de descrever o comportamento de sistemas elétricos complexos [22].

A primeira implementação teve lugar em 1973, pelos pioneiros Mamdani e Assilian, que utilizaram o conceito de lógica difusa para controlar um motor a vapor. Nos anos seguintes, uma vez emancipado o conceito de lógica difusa, muitas outras aplicações se seguiram. No Japão, em particular, a utilização de lógica difusa em processos de controlo foi estudada em várias áreas de aplicação, entre elas, controlo automático de comboios (Hitachi), controlo de veículos (Laboratório Sugeno no Instituto de Tecnologia de Tokyo), controlo de robôs (Laboratório Hirota na Universidade Hosei), reconhecimento de discurso (Ricoh),

controlador universal (Fuji), e controlo de estabilidade (Laboratório Yamakawa na Universidade Kumamoto) [21].

O primeiro circuito integrado *Very Large Scale Integrated* (VLSI) para a realização de inferência de lógica difusa, foi desenvolvido por Togai e Watanabe em 1986 [23]. Os circuitos integrados VLSI permitem realçar o desempenho de sistemas baseados em regras difusas para aplicações em tempo real. Várias empresas, entre elas a Togai Infralogic, APTRONIX e a INFORM, foram criadas para comercializar ferramentas de *hardware* e *software* para desenvolver sistemas difusos. Fornecedores de *software* de projeto de controlo convencional, também começaram a introduzir *add-on toolbox* para o desenho de sistemas difusos. A *toolbox* de lógica difusa para o MATLAB, por exemplo, foi introduzida como componente *add-on*, em 1994 [23].

No início do século XXI, o número de trabalhos onde se utilizou o conceito difuso, aumentou de forma substancial [22].

3.2 CONJUNTOS DIFUSOS E LÓGICA DIFUSA

3.2.1 CONJUNTOS CONVENCIONAIS

A matemática define conjuntos como uma coleção de objetos que possuem uma ou mais características em comum. Os objetos que pertencem a um conjunto são denominados por membros ou elementos. As características usadas para definir um conjunto, devem ser suficientes para identificar os seus membros. Por exemplo, pessoas inscritas para um curso, podem ser denominadas pelo conjunto ESTUDANTE. No entanto, RIOS GRANDES de um país, não deve ser denominado por conjunto, a não ser que se consiga definir o comprimento mínimo para ser considerado GRANDE.

Se A é um conjunto e x um membro de A , então pode denominar-se por $x \in A$.

Também, se y é um membro do conjunto B , de tal modo que para todo o y , y é também um membro de A , então B é denominado por subconjunto de A , denominado por $B \subseteq A$.

Se B é um subconjunto de A mas todos os elementos de A não estão presentes em B , então B é denominado por subconjunto próprio de A , denomiado por $B \subset A$.

Se qualquer elemento contido em B é um elemento de A , e qualquer elemento contido em A é um elemento de B , então os subconjuntos A e B são iguais, denominando-se por $A = B$.

Para cada dois conjuntos A e B , se existe pelo menos um elemento comum x de A e B , então $x \in (A \cap B)$, onde \cap é o operador lógico de interseção.

Para cada dois conjuntos A e B , se existe pelo menos um elemento x , tal que x é membro de A ou B , então $x \in (A \cup B)$, onde \cup é o operador lógico de união.

O conjunto universal U , num determinado domínio, é um conjunto que inclui todos os membros possíveis desse domínio. Por outra palavras, todos os conjuntos de um determinado domínio, são subconjuntos do conjunto universal U [24].

3.2.2 PROPRIEDADES DOS CONJUNTOS DIFUSOS

Num conjunto convencional, a condição que define as suas fronteiras, é muito rígida. Por exemplo, considerando um conjunto universal IDADE, IDOSO, MUITO IDOSO, JOVEM, CRIANÇA e BEBÉ são subconjuntos do conjunto universal IDADE. A aproximação convencional para definir estes conjuntos é a seguinte:

$$\text{BEBÉ} = \{\text{idade} \in \text{IDADE}, 0 \text{ anos} \leq \text{idade} \leq 1 \text{ ano}\},$$

$$\text{CRIANÇA} = \{\text{idade} \in \text{IDADE}, 1 \text{ ano} \leq \text{idade} \leq 10 \text{ anos}\},$$

$$\text{JOVEM} = \{\text{idade} \in \text{IDADE}, 19 \text{ anos} \leq \text{idade} \leq 60 \text{ anos}\},$$

$$\text{IDOSO} = \{\text{idade} \in \text{IDADE}, 60 \text{ anos} \leq \text{idade} \leq 80 \text{ anos}\},$$

e MUITO IDOSO = {idade ∈ IDADE, 80 anos ≤ idade ≤ 120 anos}.

Nas definições acima, idade, é a variável que pode ter qualquer valor do intervalo [0, 120] anos. É visível pelas definições, que as fronteiras de cada conjunto são distintas. Assim, uma idade igual a 11 meses e 29 dias, é membro do conjunto BEBÉ, mas uma vez que a idade seja igual a 1 ano, pertencerá ao conjunto CRIANÇA. Assim, existe uma demarcação acentuada na definição da fronteira dos conjuntos BEBÉ e CRIANÇA, quando a idade é igual a 1 ano. Uma demarcação acentuada das fronteiras de dois conjuntos, num sistema de medidas numa situação do mundo real, pode significar a má alocação dos membros de um determinado conjunto [24].

Outra característica dos conjuntos convencionais, inclui a atribuição do grau de pertença igual a “um” para todos os seus membros, e “zero” para todos os que não são membros. A conotação seguinte é utilizada para descrever que a pertença de um elemento x , num conjunto A , é igual a “um”, e a pertença de um elemento y que não pertence ao conjunto A , é “zero”.

$$\mu_A(x) = 1 \quad (3.1)$$

$$\mu_A(y) = 0 \quad (3.2)$$

Contrariamente ao conjunto convencional, todos os elementos do conjunto universo U são membros de um dado conjunto A . Assim, para cada elemento $x \in U$,

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1 \quad (3.3)$$

Todos os elementos de um conjunto universal U , são membros de um determinado conjunto difuso A , portanto, dois conjuntos difusos A e B podem sobrepor-se na definição das suas fronteiras. Por exemplo, em contraste com os respetivos conjuntos convencionais: BEBÉ, CRIANÇA, JOVEM, IDOSO e MUITO IDOSO, os conjuntos difusos correspondentes permitem qualquer idade num intervalo de [0, 120] anos como membro de cada um dos conjuntos mencionados, mas com diferentes graus de pertença entre [0, 1]. Por exemplo, a idade de 22 anos é um membro de todos os conjuntos difuso mas o grau de pertença da

idade igual a 22, para pertencer aos conjuntos BEBÉ, CRIANÇA, JOVEM, IDOSO e MUITO IDOSO é, respetivamente, 0.001, 0.01, 1.00, 0.60 e 0.20. O exemplo mencionado faz sentido numa linha de raciocínio em que, uma idade de 22 anos, corresponde a uma pessoa jovem, então, o grau de pertença da idade 22 para ser jovem, é elevado (1.00). A classificação relativa dos outros graus de pertença, podem assim ser facilmente entendidos através do significado usual dos termos BEBÉ, CRIANÇA, IDOSO e MUITO IDOSO. Os conjuntos difusos podem então ser definidos da seguinte forma:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) : x \in X\} \quad (3.4)$$

onde X é um conjunto universal de objectos, e $\mu_A(x)$ é o grau de pertença do objecto x em A . Normalmente, $\mu_A(x)$ está compreendido no intervalo fechado de $[0, 1]$, como exemplificado na Figura 27 [24]. Os parâmetros presentes na seguinte figura serão apresentados nas subsecções seguintes.

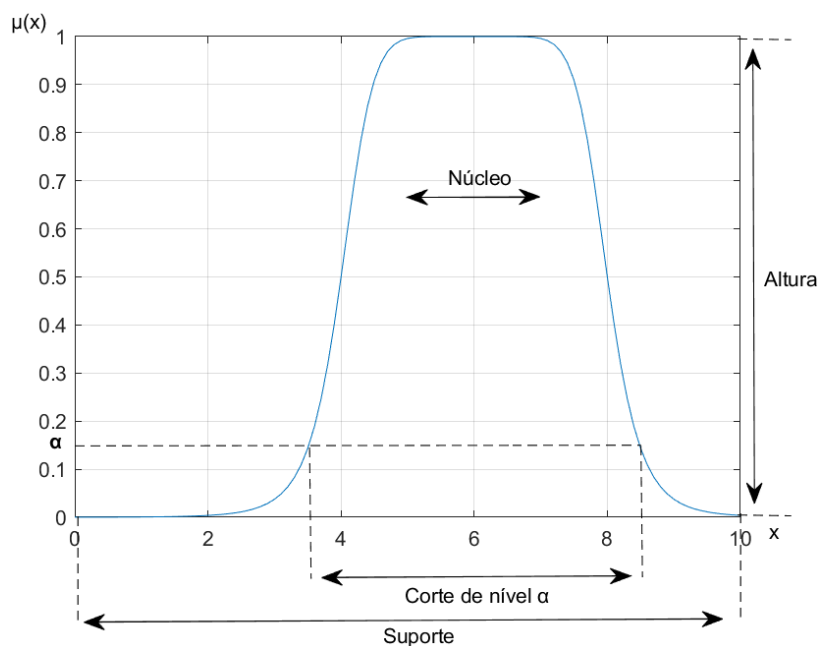


Figura 27 – Legenda dos parâmetros dos conjuntos difusos.

3.2.2.1 SUPORTE DE UM CONJUNTO DIFUSO

O suporte de um dado conjunto difuso A é o conjunto rígido com a propriedade seguinte:

$$\text{supp}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (3.5)$$

3.2.2.2 NÚCLEO DE UM CONJUNTO DIFUSO

O núcleo de um dado conjunto difuso A é o conjunto rígido com a propriedade seguinte:

$$\text{core}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (3.6)$$

Na literatura dos conjuntos difusos, é utilizado o termo *kernel* como sinónimo de núcleo.

3.2.2.3 ALTURA DE UM CONJUNTO DIFUSO

A altura é o maior valor do grau de pertença de todos os elementos, num determinado conjunto difuso A , isto é:

$$h(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x) \quad (3.7)$$

3.2.2.4 CORTE DE NÍVEL ALFA

Um dos conceitos importantes utilizado nos conjuntos difusos é o corte de nível alfa. O corte de nível alfa $A^{(\alpha)}$ é definido da seguinte forma:

$$A^{(\alpha)} = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (3.8)$$

onde $\alpha \in [0, 1]$.

O corte de nível alfa do conjunto difuso A , é um conjunto rígido que contém todos os elementos de X , cujos graus de pertença em A , são maiores ou iguais ao valor de α [25].

3.2.2.5 CONJUNTO DIFUSO NORMALIZADO

Um conjunto difuso A é normalizado, se o grau de pertença de pelo menos um elemento, é igual a um, isto é:

$$\exists x \in X, \mu_A(x) = h(x) = 1 \quad (3.9)$$

3.2.2.6 PONTO DE CRUZAMENTO

O elemento x_{cp} de um conjunto difuso A , que tem um grau de pertença igual a 0,5, representa o ponto de cruzamento, isto é:

$$x_{cp} = \{x \in X | \mu_A(x) = 0,5\} \quad (3.10)$$

3.2.2.7 CONVEXIDADE DOS CONJUNTOS DIFUSOS

Um conjunto difuso é considerado convexo se e só se:

$$\mu_A(\lambda x + (1 - \lambda)y) \geq \min(\mu_A(x), \mu_A(y)) \quad (3.11)$$

para todo o x e $y \in X$, e todo o $\lambda \in [0, 1]$. É indicada uma representação dos conjuntos convexo e não-convexo na Figura 28 [25].

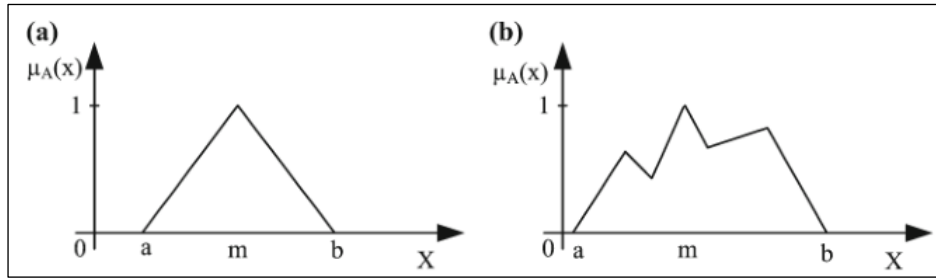


Figura 28 – Conjuntos (a) convexo e (b) não-convexo [25].

3.2.2.8 T-NORMA

A norma triangular (t-norma) é uma ferramenta indispensável para a interpolação de conjunções na lógica difusa e, subsequentemente, para a interseção de conjuntos difusos [26].

A t-norma é uma operação binária T no intervalo unitário $[0, 1]$, que é comutativa, associativa, monótona e possui o valor “1” como elemento neutro, ou seja, é uma função $T: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ para todo $x, y, z \in [0, 1]$:

$$(T1) \quad T(x, y) = T(y, x) \quad \text{Comutatividade} \quad (3.12)$$

$$(T2) \quad T(x, T(y, z)) = T(T(x, y), z) \quad \text{Associatividade} \quad (3.13)$$

$$(T3) \quad T(x, y) \leq T(x, z), \text{ sempre que } y \leq z \quad \text{Monotonicidade} \quad (3.14)$$

$$(T4) \quad T(x, 1) = x \quad \text{Elemento Neutro: 1} \quad (3.15)$$

Como a t-norma é uma operação algébrica no intervalo unitário $[0, 1]$, é preferível utilizar a notação de tipo $x * y$, em vez da notação $T(x, y)$. De facto, alguns dos axiomas (T1) - (T4) tornam-se mais intuitivos, para todo o $x, y, z \in [0, 1]$:

$$(T1) \quad x * y = y * x \quad \text{Comutatividade} \quad (3.16)$$

$$(T2) \quad x * (y * z) = (x * y) * z \quad \text{Associatividade} \quad (3.17)$$

$$(T3) \quad x * y \leq x * z, \text{ sempre que } y \leq z \quad \text{Monotonicidade} \quad (3.18)$$

$$(T4) \quad (x * 1) = x \qquad \text{Elemento Neutro: } 1 \qquad (3.19)$$

De seguida, são apresentadas as quatro T-normas básicas, Figura 29, denominadas por *mínimo* T_M , o *produto* T_P , *t-norma Lukasiewicz* T_L , e o *produto drástico* T_D , que são dadas respetivamente por:

$$T_M(x, y) = \min(x, y), \qquad (3.20)$$

$$T_P(x, y) = x \cdot y, \qquad (3.21)$$

$$T_L(x, y) = \max(x + y - 1, 0), \qquad (3.22)$$

$$T_D(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{se } (x, y) \in [0, 1[^2 \\ \min(x, y), & \text{noutro caso} \end{cases} \qquad (3.23)$$

A condição de contorno (T4) e de monotonicidade (T3) estão apresentadas na sua forma mínima. Um conjunto com (T1) segue que, para todo $x \in [0, 1]$, cada t-norma T satisfaz:

$$T(0, x) = T(x, 0) = 0, \qquad (3.24)$$

$$T(1, x) = x. \qquad (3.25)$$

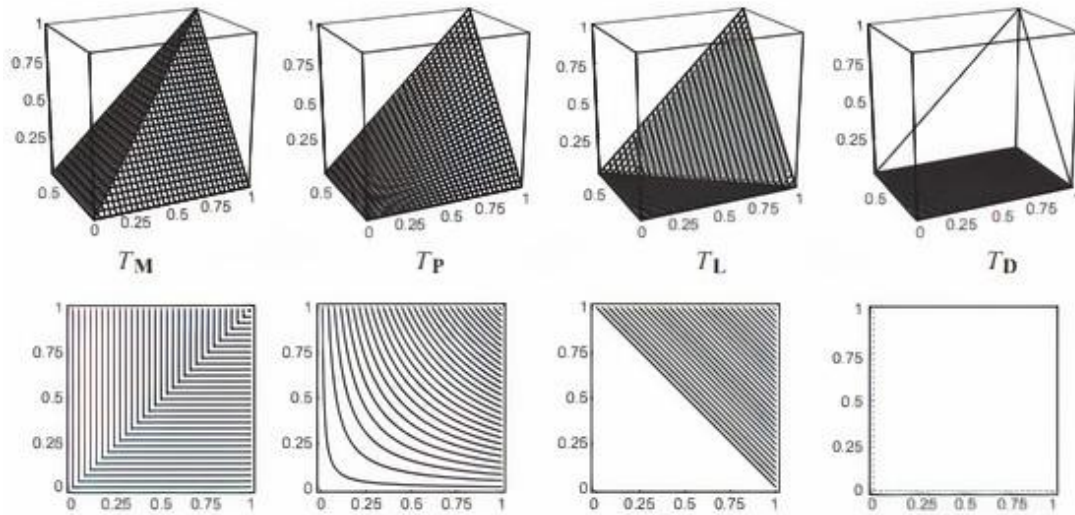


Figura 29 – Projeções 3D (linha superior) e projeções de contorno (linha inferior) das quatro t-conormas T_M , T_P , T_L e T_D [26].

3.2.2.9 S-NORMA OU T-CONORMA

A s-norma é uma operação binária S no intervalo unitário $[0, 1]$, que é comutativa, associativa, monótona e possui o valor “0” como elemento neutro, ou seja, é a função $S: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$ que satisfaz, para todo o $x, y, z \in [0, 1]$, (S1) - (S3) e (S4):

$$(S4) \quad S(x, 0) = x \quad (3.26)$$

As s-normas seguintes são as quatro mais básicas, designadas pelo *máximo* S_M , a *soma probabilística* S_P , a *s-norma Lukasiewicz* S_L , e a *soma drástica* S_D , que são dadas respetivamente por [26]:

$$S_M(x, y) = \max(x, y), \quad (3.27)$$

$$S_P(x, y) = x + y - x \cdot y, \quad (3.28)$$

$$S_L(x, y) = \min(x + y, 1), \quad (3.29)$$

$$S_D(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } (x, y) \in [0, 1]^2 \\ \max(x, y), & \text{noutro caso} \end{cases} \quad (3.30)$$

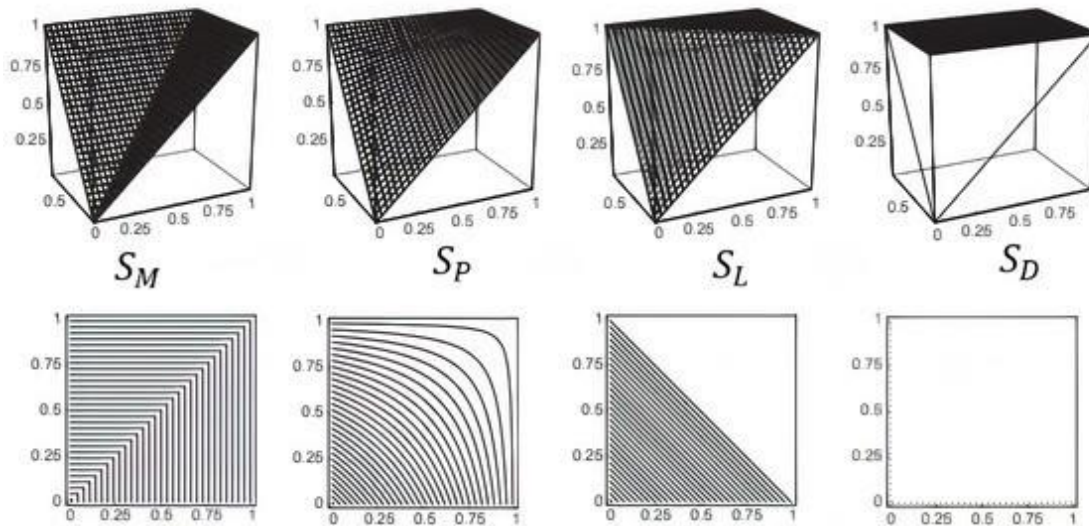


Figura 30 – Projeções 3D (linha superior) e projeções de contorno (linha inferior) das quatro t-conormas SM, SP, SL e SD [26].

3.3 OPERAÇÕES COM CONJUNTOS DIFUSOS

Existem vários conceitos que relacionam conjuntos difusos. Nesta subsecção, serão abordadas algumas das operações conhecidas.

3.3.1 IGUALDADE

Os conjuntos difusos A e B são iguais ($A = B$), se $\forall x \in X$:

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (3.31)$$

3.3.2 INCLUSÃO

Um conjunto difuso A está incluído no conjunto difuso B , se para todo $x \in X$ se verificar:

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (3.32)$$

Consequentemente, o conjunto difuso A é um subconjunto do conjunto difuso B .

3.3.3 UNIÃO

A união de dois conjuntos difusos A e B é indicada por $A \cup B$, e é definida pelo conjunto difuso mais pequeno, que contém os conjuntos difusos A e B , Figura 31. Uma consequência imediata desta definição é que a função de pertença de $A \cup B$ é dada por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{Max}[\mu_A(x), \mu_B(x)]. \quad (3.33)$$

Assim, se um determinado ponto x , por exemplo, $\mu_A(x) = 0,8$, e $\mu_B(x) = 0,5$, então, nesse ponto x , o valor de pertença será $\mu_{A \cup B}(x) = 0,8$ [20].

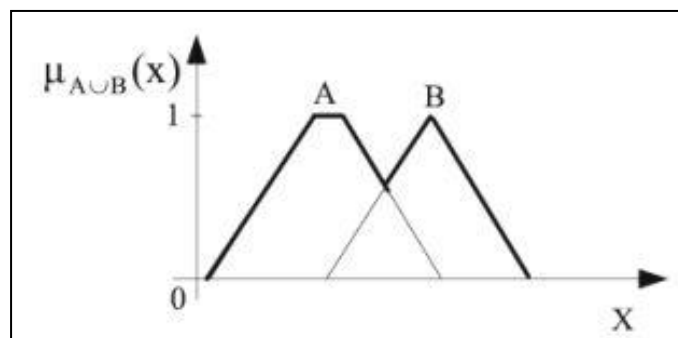


Figura 31 – União de dois conjuntos difusos A e B [25].

3.3.4 INTERSECÇÃO

A interseção de dois conjuntos difusos A e B é indicada por $A \cap B$, e é definida pelo maior conjunto difuso contido nos conjuntos A e B , Figura 32. A função de pertença de $A \cap B$ é dada por [20]:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{Min}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.34)$$

Neste caso, se $\mu_A(x) = 0,8$ e $\mu_B(x) = 0,5$, então $\mu_{A \cap B}(x) = 0,5$.

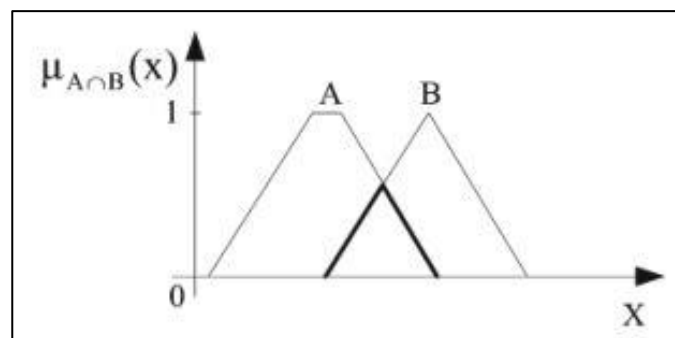


Figura 32 – Interseção de dois conjuntos difusos A e B [25].

3.3.5 COMPLEMENTO

Um conjunto difuso A' , Figura 33, é o complemento do conjunto difuso A se, e apenas se:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3.35)$$

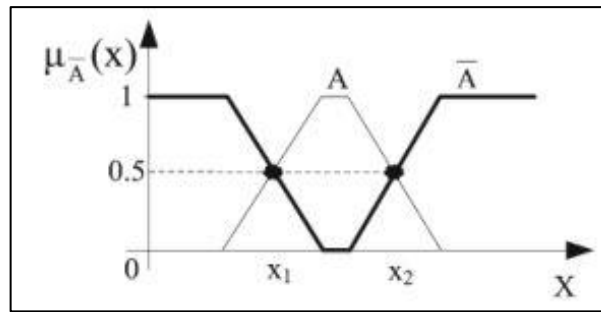


Figura 33 – Complemento do conjunto difuso [25].

3.4 FUNÇÕES DE PERTENÇA

O grau de pertinência $\mu_A(x)$ mapeia o objeto ou o seu atributo x , a números reais positivos compreendidos no intervalo $[0, 1]$. Devido às suas características de mapeamento de uma função, é denominado por "função de pertinência". Uma definição formal de uma função de pertinência pode ser dada como:

$$\mu_A: x \rightarrow [0, 1], x \in X \quad (3.36)$$

onde x é um número real que descreve um objeto ou o seu atributo, X é o conjunto universo, e A é um subconjunto de X .

Analisando o exemplo mencionado na subsecção anterior, bem como as funções de pertinência ilustradas na Figura 34, verifica-se que a curva para o conjunto difuso CRIANÇA atinge o seu pico numa idade ligeiramente superior a zero, e tem uma queda abrupta após o seu pico. A interpretação lógica desta curva, está relacionada com o significado da palavra criança. A curva de pertinência para o conjunto difuso JOVEM, tem o seu pico na idade de 25 anos e decresce lentamente para os dois sentidos, à volta do pico. Como a juventude é o período mais encantador para o ser humano, é preferível denominar-se uma determinada pessoa por JOVEM, mesmo que a idade esteja longe dos 25 anos, nos dois sentidos. É possível observar ainda as curvas de pertinência de IDOSO e MUITO IDOSO, onde se pode verificar que a curva de IDOSO tem um maior valor de pertinência que a curva de MUITO IDOSO até que ambas saturam à idade de 120 anos. Isto deve-se ao facto que se alguém é chamado de MUITO IDOSO, então tem que ser IDOSO, mas o inverso pode não ser verdade.

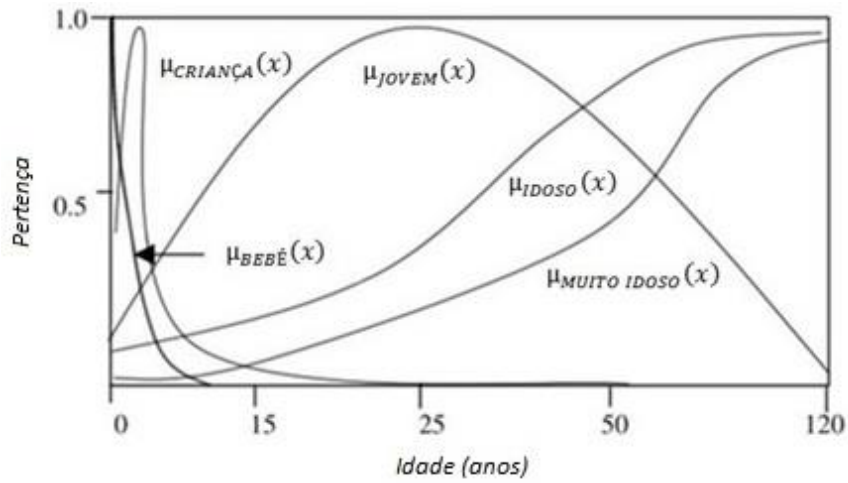


Figura 34 – Funções de pertinência dos conjuntos difusos: BEBÉ, CRIANÇA, JOVEM, IDOSO e MUITO IDOSO [24].

Existem várias formas de representar as funções de pertinência indicadas na Figura 34, através de expressões matemáticas. Por exemplo:

$$\mu_{\text{CRIANÇA}}(x) = \frac{ax^2}{1 + bx^2 + cx}, a, b, c > 0 \quad (3.37)$$

$$\mu_{\text{JOVEM}}(x) = e^{-\frac{(x-25)^2}{2\sigma^2}}, \sigma > 0 \quad (3.38)$$

$$\mu_{\text{IDOSO}}(x) = 1 - e^{-dx^2}, d > 0 \quad (3.39)$$

$$\mu_{\text{MUITO IDOSO}}(x) = 1 - e^{-dx}, d > 0 \quad (3.40)$$

Os parâmetros a , b , c e d são selecionados intuitivamente pelas pessoas, baseado no seu julgamento subjetivo dos domínios respectivos. O ajuste dos parâmetros, são necessários para controlar a curvatura e as alterações abruptas nas curvas, à volta de alguns valores de x [24].

3.4.1 FUNÇÕES DE PERTENÇA COMUNS

As funções de pertinência podem ter qualquer forma, mas na maioria das aplicações, utilizam-se as funções Υ , S, L, triangulares, Π ou Gaussianas (forma de sino) [24].

3.4.1.1 A FUNÇÃO Υ

Esta função possui os parâmetros α e β , e é definida como:

$$\gamma(u; \alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & u \leq \alpha \\ \frac{u - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha < u \leq \beta \\ 1, & u > \beta \end{cases} \quad (3.41)$$

A Figura 35 descreve a representação gráfica da função γ .

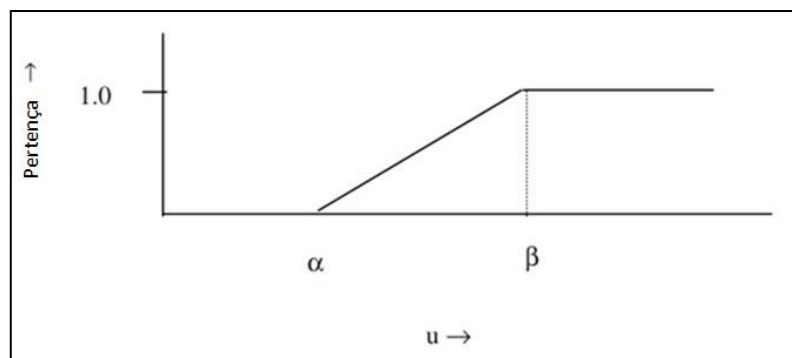


Figura 35 – Curva de pertinência para a função γ [24].

A função de pertinência IDOSO, mencionada no exemplo da subsecção 3.4, pode ser descrita por uma função γ . Supõe-se que podemos chamar alguém de IDOSO, com alguma pertinência positiva se a idade excede os 60 anos, e chamar alguém de IDOSO com a pertinência igual a 1, quando a sua idade atinge os 90 anos. Então, a função γ , no contexto presente, deve ser γ (idade; 60, 90) [24].

3.4.1.2 A FUNÇÃO S

A função S, é uma versão suave da função γ , mencionada na subsecção 3.4.1.1. É normalmente definida como:

$$S(u; \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0, & u \leq \alpha \\ 2\left[\frac{u - \alpha}{\gamma - \alpha}\right]^2, & \alpha < u \leq \beta \\ 1 - 2\left[\frac{u - \gamma}{\gamma - \alpha}\right]^2, & \beta < u \leq \gamma \\ 1, & u > \gamma \end{cases} \quad (3.42)$$

Geralmente, $\beta = (\alpha + \gamma)/2$, é considerada na maioria das aplicações de lógica difusa. Uma representação típica da função S é a apresentada na Figura 36.

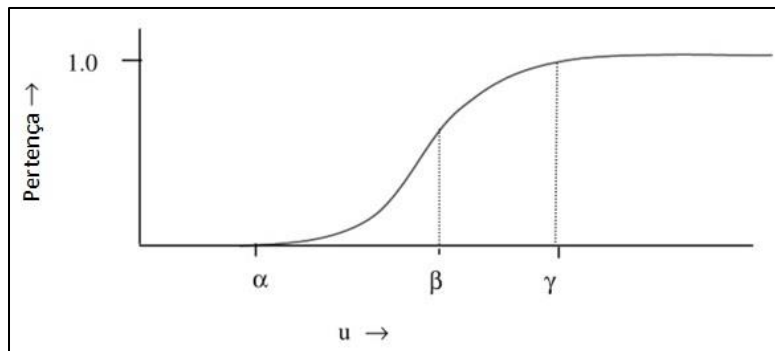


Figura 36 – Uma forma típica de uma função S [24].

A função S pode também ser usada para representar a função de pertinência MUITO IDOSO. Como a inclinação da função em $u = \alpha$ é muito pequena, podemos seleccionar uma idade mais pequena u , para representar a função de pertinência IDOSO e, por exemplo, $S(idade; 40,60,90)$ pode ser uma escolha para a representação da função de pertinência MUITO IDOSO [24].

3.4.1.3 FUNÇÃO L

A função L é inversa à função γ , e pode ser matematicamente definida como:

$$L(u; \alpha, \beta) = \begin{cases} 1, & u < \alpha \\ 1 + \frac{\alpha - u}{\beta - \alpha}, & \alpha \leq u \leq \beta \\ 0, & u > \beta \end{cases} \quad (3.43)$$

A Figura 37 descreve a representação gráfica da função L.

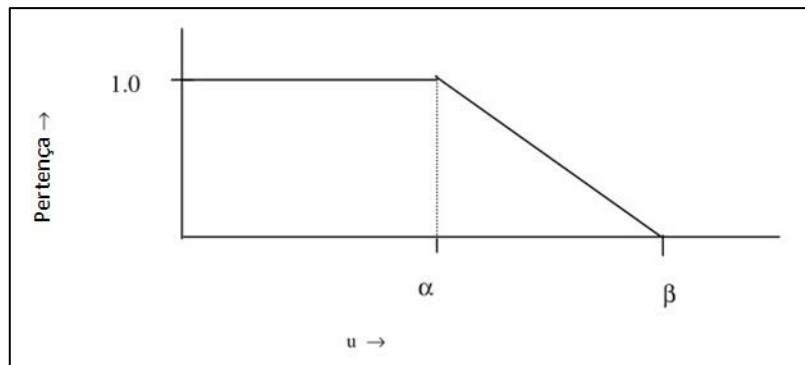


Figura 37 – Uma forma típica de uma função L [24].

As funções L são geralmente usadas para representar a linguagem difusa quando se utiliza a expressão "positivo pequeno". Supondo que u é uma variável difusa que deve ter um valor positivo, à medida que esta aumenta, o seu valor de pertinência deve diminuir [24].

3.4.1.4 FUNÇÃO TRIANGULAR

A função triangular, pode ser representada da seguinte forma:

$$A(u; \alpha, \beta, \gamma) = \begin{cases} 0, & u \leq \alpha \\ \frac{u - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha < u \leq \beta \\ 1 + \frac{\alpha - u}{\beta - \alpha}, & \beta < u \leq \gamma \\ 0, & u > \gamma \end{cases} \quad (3.44)$$

Uma possível representação gráfica pode ser observada na Figura 38.

A função de pertinência JOVEM, por exemplo, pode ser representada por uma função de pertinência triangular. Como exemplo, podem atribuir-se os valores de idade $\alpha = 20$, $\beta = 25$ e $\gamma = 30$, como parâmetros típicos da função de pertinência JOVEM, para representá-la através de uma função de pertinência triangular.

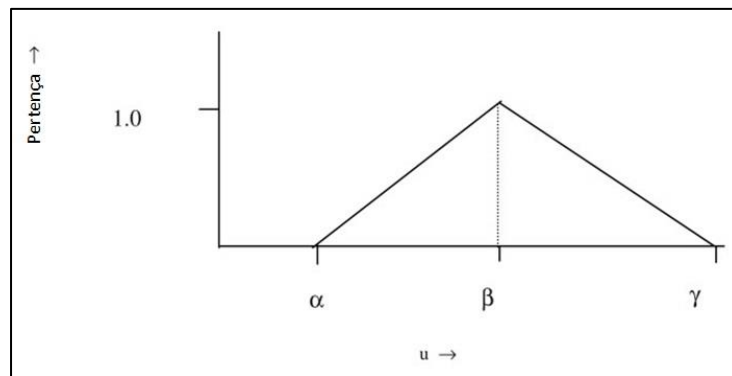


Figura 38 – Uma forma típica de uma função de pertinência triangular [24].

3.4.1.5 FUNÇÃO Π

A função Π pode normalmente ser descrita da seguinte forma:

$$\Pi(u; \alpha, \beta, \gamma, \delta) = \begin{cases} 0, & u \leq \alpha \\ \frac{u - \alpha}{\beta - \alpha}, & \alpha < u \leq \beta \\ 1, & \beta < u \leq \gamma \\ 1 + \frac{\gamma - u}{\delta - \gamma}, & \gamma < u \leq \delta \\ 0, & u > \delta \end{cases} \quad (3.45)$$

Uma representação gráfica típica da função Π , pode ser observada na Figura 39. Esta função é utilizada para representar a linguagem difusa "nem tão alto nem tão baixo".

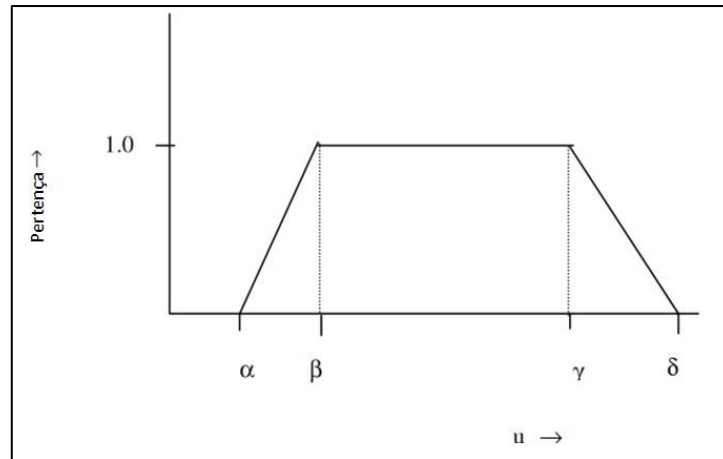


Figura 39 – Típica representação gráfica de uma função Π [24].

3.4.1.6 FUNÇÃO GAUSSIANA

A função de pertinência Gaussiana é definida como:

$$G(u; m, \sigma) = e^{-\left[\frac{u-m}{\sqrt{2}\sigma}\right]^2} \quad (3.46)$$

Os parâmetros m e σ controlam o centro e a largura da função de pertinência. Uma representação gráfica da função de pertinência Gaussiana é apresentada na Figura 40.

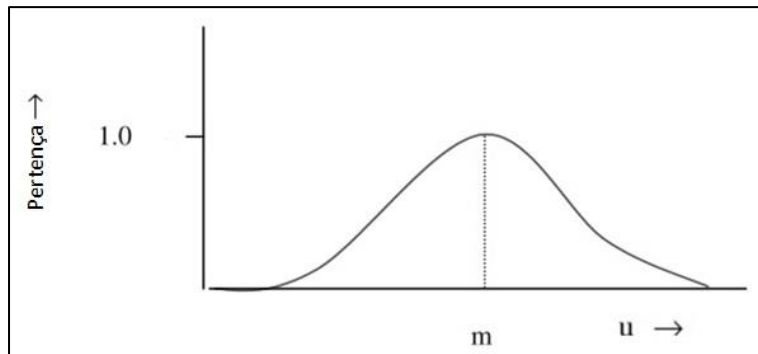


Figura 40 – Típica representação gráfica de uma função Gaussiana [24].

A função de pertença Gaussiana possui uma vasta gama de aplicações na literatura dos conjuntos e sistemas difusos. A função de pertença JOVEM, ilustrada na subsecção 3.4, por exemplo, pode ser também descrita por uma função de pertença Gaussiana com um valor de $m = 22$. Quanto mais pequeno for o valor de variação da curva (σ), mais acentuada é a queda à volta do valor médio [24].

3.5 LÓGICA DIFUSA: PRINCÍPIOS BÁSICOS

A lógica difusa pode ser vista como uma extensão da lógica multi-valor, no entanto, as aplicações e objetivos são diferentes. Assim, o facto de a lógica difusa lidar com modos de raciocínio aproximados em vez de precisos, implica que, no geral, as cadeias de raciocínio sejam pequenas em tamanho, e o rigor não desempenhe um papel importante como nos sistemas de lógica clássica [21].

Operações e propriedades com conjuntos e lógica são isomorfas, isto é, pertencer a um conjunto é equivalente ao valor de verdade da afirmação, a união é equivalente à disjunção, a interseção é equivalente à conjunção, e o complemento é equivalente à negação nas formas seguintes:

$$\begin{aligned}
 x \in A \cap B &\Leftrightarrow (x \in A \wedge x \in B) \\
 x \in A \cup B &\Leftrightarrow (x \in A \vee x \in B) \\
 x \in \overline{A} &\Leftrightarrow \neg(x \in A)
 \end{aligned}
 \tag{3.47}$$

onde A e B podem ser definidos em diferentes conjuntos universais.

Adequadamente, na lógica difusa existem três operações principais: conjunção, disjunção e negação. Primeiro, é necessário definir a proposição e o predicado, o que é relevante para a leitura.

A proposição é uma afirmação declarativa que pode ser verdadeira, (indicada pelo valor 1), ou falsa (indicada pelo valor 0). Quando se transita da lógica binária, para a lógica multi-valor, a proposição pode ser parcialmente verdade, isto é, o valor de verdade não está limitado aos valores 1 e 0. Quando os valores de verdade podem ser expressados pelos valores reais contidos no intervalo $[0, 1]$, estamos perante uma lógica de valores infinita.

A proposição pode ser simples – elementar ou atômica – ou composta, que consiste em duas ou mais proposições atômicas, unidas por conectores lógicos.

O predicado é uma afirmação declarativa que contém uma ou mais variáveis e conectores. O predicado $P(x)$ não é uma proposição, porque x é desconhecido.

3.6 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são 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, isto é, "jovem", "não jovem", "muito jovem", "bem jovem", "idoso", "não muito idoso", "não muito jovem", etc. em vez de 20, 21, 22, 23, e assim sucessivamente. Em termos mais específicos, uma variável linguística pode ser caracterizada por: $(x, T(x), U, G, M)$ em que:

- x é o nome da variável;
- $T(x)$ é o conjunto de valores linguísticos de x ;
- U é o universo de discurso onde está definido $T(x)$;
- G é a regra sintática que gera os termos $T(x)$;
- M é a regra semântica que associa cada valor linguístico X , a um determinado conjunto difuso de U .

O significado do valor linguístico X , é caracterizado pela função de compatibilidade, $c: U \rightarrow [0,1]$, que associa a cada u de U , a sua compatibilidade com X . Assim, a compatibilidade da idade "27" com "jovem" pode ser 0,7, enquanto que a compatibilidade de "35" com "jovem", pode ser de 0,2. A função da regra semântica é relacionar as compatibilidades dos termos primários, num valor linguístico composto - exemplo de "jovem" e "idoso" em "não muito jovem e não muito idoso" - à compatibilidade do valor composto. Para este fim, expressões exemplo como "muito", "bastante", "extremamente", assim como as conectividades "e" e "ou", são tratados como operadores não lineares que modificam o significado dos seus operandos, de uma maneira específica.

Como auxílio à compreensão do conceito de variável linguística, a Figura 41 mostra a estrutura hierárquica da relação entre a variável linguística "Idade", as restrições difusas que representam o significado dos seus valores, e os valores da variável base "idade".

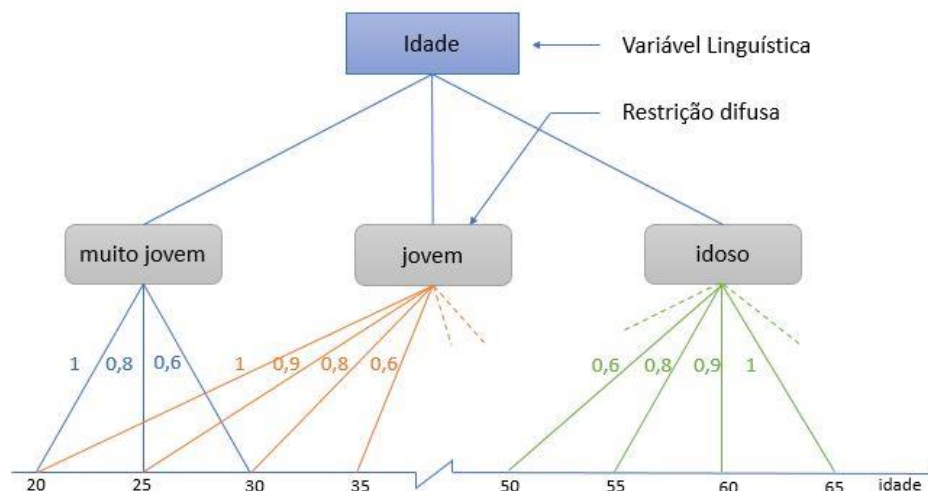


Figura 41 – Estrutura hierárquica de uma variável linguística [27].

A totalidade dos valores de uma variável linguística constituem o conjunto de valores linguísticos $T(x)$, que em princípio pode ter um número infinito de elementos. Por exemplo, o conjunto de valores linguísticos da variável linguística "Idade" pode ser:

$$\begin{aligned}
T(\text{Idade}) = & \text{jovem} + \text{n\~{a}o jovem} + \text{muito jovem} \\
& + \text{n\~{a}o muito jovem} + \text{muito muito jovem} + \dots \\
& + \text{idoso} + \text{n\~{a}o idoso} + \text{muito idoso} \\
& + \text{n\~{a}o muito idoso} + \dots \\
& + \text{n\~{a}o muito jovem e n\~{a}o muito idoso} + \dots \\
& + \text{meia idade} + \dots \\
& + \text{n\~{a}o idoso e n\~{a}o m\~{e}dia idade} + \dots \\
& + \text{extremamente idoso} \pm \dots,
\end{aligned}$$

em que o sinal "+" é utilizado para indicar a união, em vez da adição aritmética.

Neste caso, a variável numérica "idade" cujos valores 0,1,2,3,...,100 constitui o que pode ser chamado de variável base, para "Idade". Em termos desta variável, um valor linguístico tal como "jovem", pode ser interpretado como uma identificação para uma restrição difusa.

Uma restrição difusa nos valores da variável base, é caracterizada por uma função de compatibilidade, que associa cada valor da variável base, a um número do intervalo [0, 1], que representa a sua compatibilidade com a restrição difusa. Por exemplo, em relação à idade, as compatibilidades dos números 22, 28 e 35 com a restrição difusa identificada como "jovem", pode ser 1, 0.7 e 0.2, respetivamente. O significado de "jovem", poderá ser representado pelo gráfico da Figura 42, a qual é uma ilustração da função de compatibilidade "jovem", face à variável base "idade".

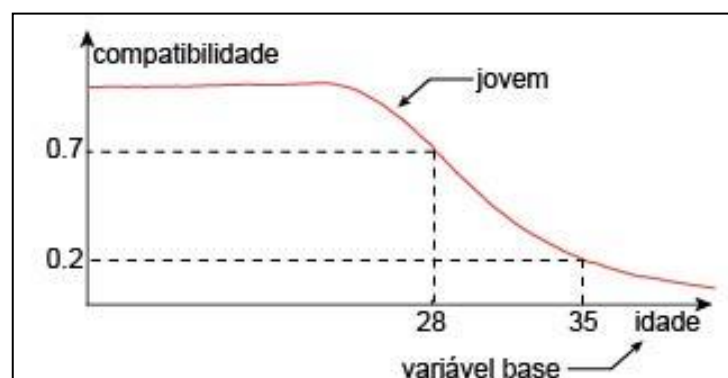


Figura 42 – Função de Compatibilidade de "jovem" [27].

Se o significado de "jovem" é representado pela função de compatibilidade "jovem" apresentada na Figura 42, então, o significado de "muito jovem" pode ser obtido através da quadratura da função de compatibilidade "jovem", enquanto que "não jovem" pode ser representado, subtraindo "jovem" ao valor unitário. As funções de compatibilidade de "muito jovem" e "não jovem" podem ser verificadas na Figura 43.

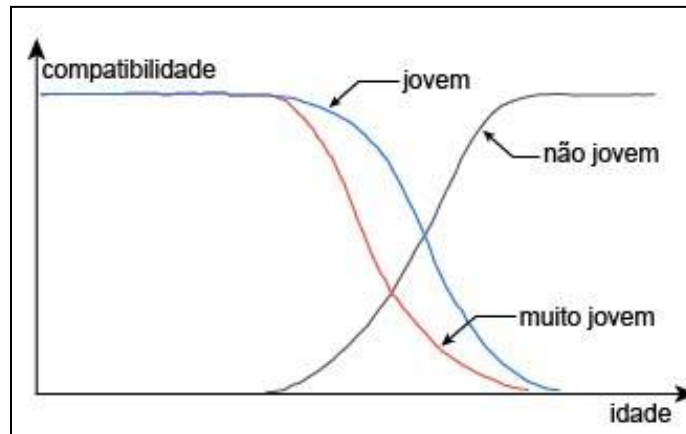


Figura 43 – Funções de compatibilidade de "jovem", "muito jovem" e "não jovem" [27].

A maioria das aplicações atuais de lógica difusa empregam uma estrutura simples, representada na Figura 44. Especificamente, as funções de pertinência assumem-se por funções triangulares ou trapezoidais, e o número de valores linguísticos variam entre três e sete [28]. No caso da Figura 44, os valores linguísticos triangulares, variam de entre "negativo grande", "negativo médio", "negativo fraco" (NG, NM, NF, respectivamente) e zero (Z), até "positivo fraco", "positivo médio" e "positivo grande" (PF, PM, PG, respectivamente).

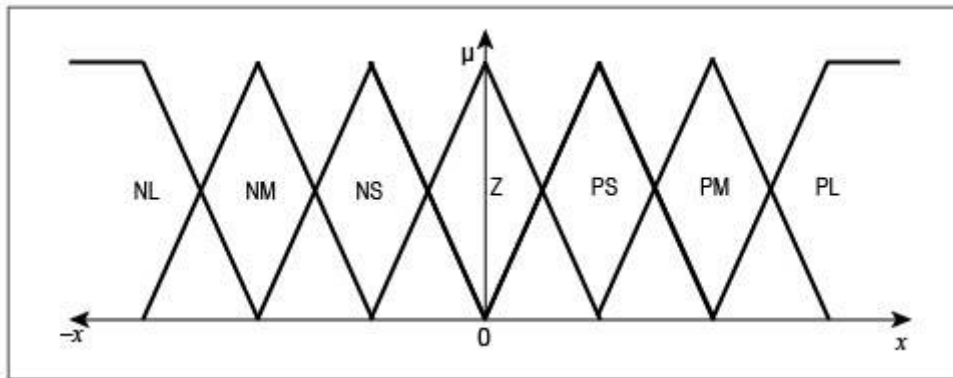


Figura 44 – Valores linguísticos triangulares [28].

3.7 INFERÊNCIA

Uma característica que distingue a lógica difusa é que tanto as premissas como as conclusões das regras de inferência, são expressas na forma canónica. Esta representação coloca em evidência o facto de cada premissa ser uma restrição numa variável, e a conclusão é uma restrição induzida que é computorizada através de um processo de propagação de restrições [21].

Na lógica difusa, as regras de inferência podem ser classificadas de várias formas. Uma classe é denominada por “regras categóricas”, que são, regras que não contêm quantificadores *fuzzy*. A classe das regras disposicionais possuem regras em que uma ou mais premissas podem conter o quantificador *fuzzy* “normalmente”. Por exemplo, a regra de inferência conhecida por “princípio de vinculação” é dada por:

$X \text{ é } A$
$A \subset B$
$X \text{ é } B$

onde X é a variável que toma valores de um universo de discurso U , e A e B são subconjuntos *fuzzy* de U . Por outro lado, o princípio de vinculação disposicional, é uma regra de inferência que possui a apresentação seguinte:

$$\text{normalmente}(X \text{ é } A)$$
$$A \subset B$$
$$\text{normalmente}(X \text{ é } B)$$

No caso limite onde o advérbio “normalmente” se transforma em “sempre”, a expressão “ $\text{normalmente}(X \text{ é } B)$ ” é simplificada pela expressão “ $X \text{ é } B$ ”. Em essência, o “princípio de vinculação” afirma que da proposição “ $X \text{ é } A$ ”, podemos sempre inferir uma proposição menos específica “ $X \text{ é } B$ ”. Por exemplo, a partir da proposição “A Maria é jovem”, que na sua forma canónica se representa da seguinte forma:

$$\text{Idade}(\text{Maria}) \text{ é } \text{JOVEM}$$

onde JOVEM é interpretado como um conjunto *fuzzy* ou, de forma equivalente, como um predicado *fuzzy*, pode-se inferir “A Maria não é idosa”, fornecendo JOVEM no complemento do subconjunto IDOSO. Isto é:

$$\mu_{\text{JOVEM}}(u) \subset 1 - \mu_{\text{IDOSO}}(u), u \in [0,100] \quad (3.48)$$

onde μ_{JOVEM} e μ_{IDOSO} são, respetivamente, as funções de pertença de JOVEM e IDOSO, e o universo de discurso é o intervalo $[0, 100]$.

Existem outras regras categóricas que desempenham um papel importante na lógica difusa. Em todas estas regras, X, Y, Z , representam variáveis que variam sobre os universos de discurso especificado e, A, B, C , são predicados difusos ou, equivalentemente, relações difusas.

3.7.1 REGRA CONJUNTIVA

A regra conjuntiva é dada por:

$X \text{ é } A$
$X \text{ é } B$
$X \text{ é } A \cap B$

onde $A \cap B$ é a interseção de A e B , definido por:

$$\mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(u), u \in U \quad (3.49)$$

3.7.2 PRODUTO CARTESIANO

O produto cartesiano é representado por:

$X \text{ é } A$
$Y \text{ é } B$
$(X, Y) \text{ é } A \times B$

onde (X, Y) é a variável binária, e $A \times B$ é definido por:

$$\mu_{A \times B}(u, v) = \mu_A(u) \wedge \mu_B(v), u \in U, v \in V \quad (3.50)$$

3.7.3 REGRA DE PROJEÇÃO

A regra de projeção é representada por:

$(X, Y) \text{ é } R$
$X \text{ é } {}_xR$

onde ${}_xR$, é a projeção binária da relação R no domínio X , a qual é definida por:

$$\mu_{{}_xR}(u) = \sup_v \mu_R(u, v), u \in U, v \in V \quad (3.51)$$

onde $\mu_R(u, v)$ é a função de pertinência de R e o supremo é retirado de $v \in V$.

3.7.4 REGRA COMPOSICIONAL

A regra composicional é obtida através de:

$X \text{ é } A$
$(X, Y) \text{ é } R$
$Y \text{ é } A \circ R$

onde $A \circ R$, representa a composição da relação unária A com a relação binária R , e é definida por:

$$\mu_{A \circ R}(v) = \sup_u (\mu_A(u) \wedge \mu_R(u, v)) \quad (3.52)$$

A regra de inferência composicional, pode ser vista como a combinação das regras conjuntiva e de projeção.

3.7.5 MODUS PONENS GENERALIZADO

O *modus Ponens* generalizado resulta em:

$X \text{ é } A$
$Y \text{ é } C \text{ se } X \text{ é } B$
$Y \text{ é } A \circ (\neg B \oplus C)$

onde $\neg B$ representa a negação de B e a soma do limite é definida por:

$$\mu_{\neg B \oplus C}(u, v) = 1 \wedge (1 - \mu_B(u) + \mu_C(v)), u \in U, v \in V \quad (3.53)$$

Uma característica importante do *modus ponens* generalizado, a qual não é aplicável em sistemas de lógica binária, é que o antecedente “ $X \text{ é } A$ ” não necessita ser idêntico à premissa “ $X \text{ é } A$ ”. Deve-se notar que o *modus ponens* generalizado pode ser considerado como uma instância da regra de inferência composicional.

3.7.6 MODUS PONENS DISPOSICIONAL

Em várias aplicações que envolvem o raciocínio do senso comum, as premissas no *modus ponens* generalizado, normalmente são qualificadas. Nesses casos, pode-se empregar uma versão disposicional do *modus ponens*, a qual pode ser expressa como:

$normalmente(X \text{ é } A)$
$normalmente(Y \text{ é } B \text{ se } X \text{ é } A)$
$normalmente^2(Y \text{ é } B)$

onde “ $normalmente^2$ ” é a quadratura de “ $normalmente$ ”, representado na Figura 45. Para simplificar, é assumido que a premissa “ $X \text{ é } A$ ” corresponde ao antecedente na condição proposicional. A proposição condicional é interpretada pela afirmação “O valor da probabilidade condicional difusa de B dado A , é o número difuso NORMALMENTE”.

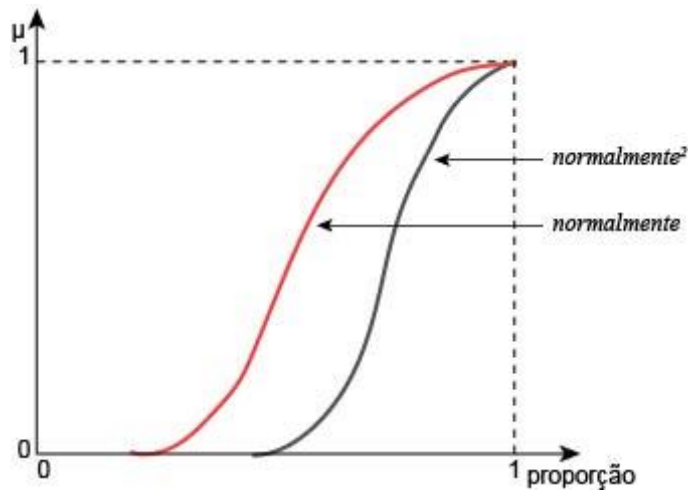


Figura 45 – Representação da função de pertinência "normalmente" e "normalmente²" [21].

3.7.7 PRINCÍPIO DE EXTENSÃO

O princípio de extensão desempenha um papel importante na lógica difusa, fornecendo um mecanismo de restrições induzidas por computação. Mais especificamente, assumindo que a variável X possui valores do universo de discurso U , é restringida pela proposição " X é A ". Além disso, assumindo que f é um mapeamento de U para V , então X é mapeado em $f(X)$. A resposta dada pelo princípio de extensão, à questão "Qual é a limitação em $f(X)$, que é imposta pela limitação em X ?", pode ser expressa pela regra de inferência seguinte:

X é A
$f(X)$ é $f(A)$

onde a função de pertinência $f(A)$ é definida por:

$$\mu_{f(A)}(v) = \sup_u \mu_A(u) \tag{3.54}$$

e sujeita à condição:

$$v = f(u), u \in U, v \in V \tag{3.55}$$

Em particular, se a função f é 1:1, simplifica-se a equação (3.54) para:

$$\mu_{f(A)}(v) = \mu_A(v^{-1}), v \in V \quad (3.56)$$

onde v^{-1} é o inverso de v . Por exemplo:

X é pequeno
X^2 é pequeno ²

Então:

$$\mu_{PEQUENO^2}(v) = \mu_{PEQUENO}(\sqrt{v}) \quad (3.57)$$

Como no caso da regra de implicação, a versão disposicional do princípio de extensão é igualmente representada de uma forma simples pelo seguinte [21]:

$normalmente(X \text{ é } A)$
$normalmente(f(X) \text{ é } f(A))$

3.8 COLAPSAGEM

O processo de colapsagem deve estar presente num sistema difuso, Figura 46, quando é necessário que um conjunto de saída *fuzzy* se converta num valor real rígido. Para obter o valor real, podem ser usadas diferentes técnicas, nomeadamente de distribuição, de máxima, e de área. De um ponto de vista aplicacional, devem ser consideradas as seguintes características para o processo de colapsagem: continuidade do resultado de colapsagem, eficiência computacional, adequação ao projeto, e compatibilidade com o sistema *fuzzy*.

Relativamente ao resultado de colapsagem, devem ser consideradas pequenas alterações nos valores de pertença do conjunto de saída, de forma a não provocar grandes alterações nos resultados de colapsagem. Esta característica é importante no caso de controladores *fuzzy*, que requerem uma relação contínua entre a entrada do sistema e a sua saída. A

eficiência computacional depende maioritariamente do tipo e do número de operações necessárias para obter o resultado da colapsagem. A adequação ao projeto expressa o impacto de uma técnica de colapsagem, na implementação do *software* ou do *hardware* e do seu ajuste ao sistema *fuzzy*. A compatibilidade está relacionada com a facilidade de integração da técnica com outras operações existentes no sistema *fuzzy*, como por exemplo, a importância da inferência [29].

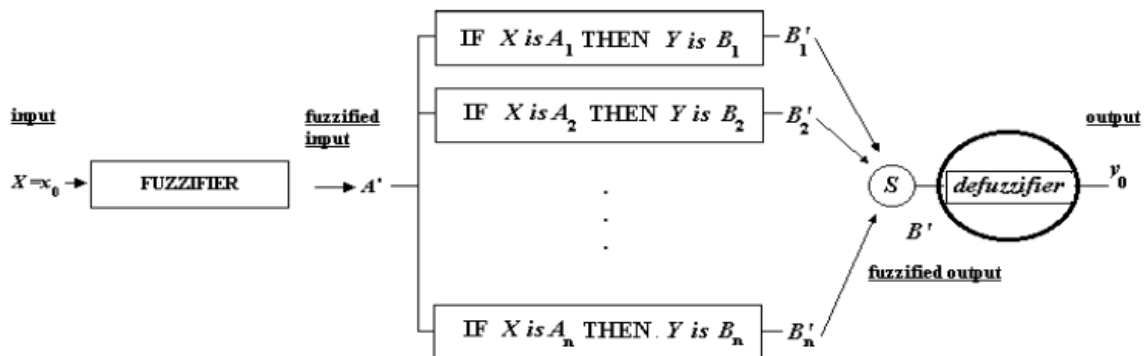


Figura 46 – Sistema *fuzzy* baseado em regras ‘se-então’ [29].

3.8.1 TÉCNICAS DE DISTRIBUIÇÃO

A característica principal das técnicas de distribuição, consiste em tratar o conjunto de saída da função de pertinência como uma distribuição, para o qual o valor médio é avaliado. Devido à aproximação heurística, a saída possui alterações contínuas e suaves, relativamente às alterações da variável de entrada no universo de discurso. A técnica deste grupo é denominada por COG (*Center Of Gravity*), que é dada pela equação (3.58), na forma discreta, e utilizando as legendas das variáveis da Tabela 4.

$$y_0 = defuzzifier(B') = \frac{\sum_{i=1}^{N_q} B'(y_i)y_i}{\sum_{i=1}^{N_q} B'(y_i)} = cog(B'), \quad (3.58)$$

onde: N_q é o número de amostras y_i , utilizado para obter a forma discreta da função de pertinência $B'(y)$ do conjunto de saída *fuzzy* B' . O cálculo de y_0 necessita de $3N_q - 1$

operações. Esta técnica é menos conveniente para implementação de *hardware*, porque requiere um elevado número de multiplicadores, assim como o varrimento de todo o universo de discurso da variável de saída. Mesmo assim, devido à continuidade e suavidade das alterações dos valores resultantes da colapsagem, esta técnica é utilizada em controladores *fuzzy* [29].

3.8.2 TÉCNICAS DE MÁXIMA

As técnicas de máxima retornam o resultado da colapsagem de um elemento de um núcleo *fuzzy*. A técnica FOM (*First Of Maxima*) pertence ao grupo das técnicas de máxima, e é dada pela equação (3.59).

$$y_0 = \text{mincore}(B') = \text{fom}(B') \quad (3.59)$$

Este tipo de técnica é geralmente conveniente para os sistemas *fuzzy*. São computacionalmente eficientes, pois requerem $2N_q$ operações de amostra. As técnicas de máxima pertencem ao grupo das técnicas de colapsagem com menor tempo de resposta, pois necessitam apenas de efetuar um varrimento dos valores do núcleo [29].

Analisando a Figura 47, e aplicando a técnica FOM, resultaria em $y_0 = 4$.

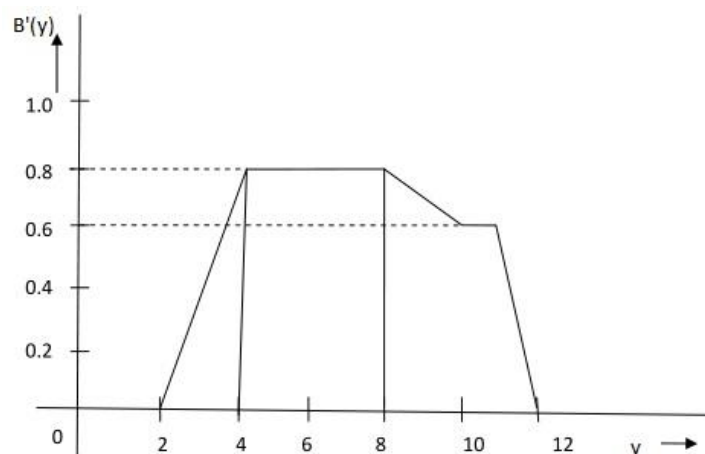


Figura 47 – Exemplo de função $B'(y)$ [30].

Além da técnica FOM, existem ainda as técnicas LOM (*Last Of Maxima*), e MOM (*Mean Of Maxima*).

Aplicando a técnica LOM, e analisando novamente a Figura 47, $y_0 = 8$.

No caso da técnica MOM, o valor resultante da colapsagem é tomado como o elemento com os maiores valores de pertinência. No caso de haver mais do que um elemento com o maior valor de pertinência, é adotada a média da máxima. Para este método, aplicamos a equação (3.60).

$$y_0 = \frac{\sum_{y_i \in M} y_i}{|M|} \quad (3.60)$$

onde $M = \{y_i | B'(y_i)\}$ é igual à altura do conjunto *fuzzy* B' , e $|M|$ é o número de elementos do conjunto M [30].

3.8.3 TÉCNICAS DE ÁREA

As técnicas de colapsagem de área, recorrem ao cálculo da área da função de pertinência, para determinar o valor de colapsagem. A técnica COA (*Center Of Area*) utiliza a expressão seguinte:

$$\left| \sum_{\inf y}^{coa(B')} B'(y) - \sum_{coa(B')}^{\sup y} B'(y) \right| \quad (3.61)$$

onde: *inf* é o maior limite inferior, e *sup* é o limite superior mínimo do suporte do conjunto *fuzzy* B' , respetivamente. A expressão (3.61) resulta no valor numérico $y_0 = y_{coa(B')}$, o qual divide a área sob a função de pertinência, em duas partes aproximadamente iguais. O valor $y_{coa(B')}$ é diferente do valor obtido pela técnica de colapsagem COG. O cálculo do valor da colapsagem COA necessita $4N_q$ operações. Este método é rápido, porque utiliza apenas operações simples, apresenta uma alteração contínua do valor de colapsagem, sendo aplicável a sua utilização em controladores *fuzzy* [29].

3.9 PROPOSIÇÕES DIFUSAS

3.9.1 MODELOS DIFUSOS BASEADOS EM REGRAS

Nos modelos difusos baseados em regras, as relações entre variáveis são representadas por regras "se-então" na forma genérica seguinte:

*Se proposição antecedente **então** proposição consequente.*

A proposição antecedente é sempre uma proposição difusa do tipo " x é A ", onde x é uma variável linguística e A é uma constante linguística. O valor de verdade da proposição, depende do grau de correspondência entre x e A [31].

3.9.2 CONSTRUÇÃO E REPRESENTAÇÃO DE UMA BASE DE REGRAS

As regras podem utilizar várias variáveis, seja no campo das condições ou no das conclusões. Os controladores podem, portanto, ser aplicados a problemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO-*Multi Input Multi Output*), e a problemas de uma entrada e uma saída (SISO-*Single input Single output*). O controlador típico SISO serve para regular um sinal de controlo, baseado na informação do erro proveniente do sistema a controlar. Basicamente, um controlador linguístico contém regras no formato se-então, mas podem ser apresentadas em diferentes formatos [32] :

Se erro é Negativo e alteração ao erro é Negativa então saída é Negativo Alto

Se erro é Negativo e alteração ao erro é Zero então saída é Negativo Médio

Se erro é Negativo e alteração ao erro é Positiva então saída é Zero

Se erro é Zero e alteração ao erro é Negativa então saída é Negativo Médio

Se erro é Zero e alteração ao erro é Zero então saída é Zero

Se erro é Zero e alteração ao erro é Positiva então saída é Positivo Médio

Se erro é Positivo e alteração ao erro é Negativa então saída é Zero

Se erro é Positivo e alteração ao erro é Zero então saída é Positivo Médio

Se erro é Positivo e alteração ao erro é Positiva então saída é Positivo Baixo

onde, Zero, Positivo e Negativo são designações dos conjuntos difusos, assim como Negativo Alto, Negativo Baixo, Positivo Alto e Positivo Médio. O mesmo conjunto de regras pode ser apresentado num formato relacional, representado pela Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplo de um conjunto de regras de um controlador difuso [32].

Erro	Alteração ao erro	Saída
Positivo	Positivo	Positivo Alto
Positivo	Zero	Positivo Médio
Positivo	Negativo	Zero
Zero	Positivo	Positivo Médio
Zero	Zero	Zero
Zero	Negativo	Negativo Médio
Negativo	Positivo	Zero
Negativo	Zero	Negativo Médio
Negativo	Negativo	Negativo Alto

A linha do topo, representa os nomes das variáveis. As duas colunas da esquerda são as entradas, a coluna da direita é a saída, e cada linha representa uma regra. Um terceiro formato é representado em forma de uma tabela linguística, como indicado na Tabela 4.

Tabela 4 – Representação das regras de controlo difuso, através de um formato tabular.

		Alteração ao erro		
		Negativo	Zero	Positivo
Erro	Negativo	Negativo Alto	Negativo Médio	Zero
	Zero	Negativo Médio	Zero	Positivo Médio
	Positivo	Zero	Positivo Médio	Positivo Alto

Este método é ainda mais compacto. As entradas estão dispostas ao longo dos eixos, e a variável de saída encontra-se dentro da tabela. No caso de a tabela apresentar células vazias, é uma indicação de falta de regra. Por último, é possível apresentar graficamente as curvas difusas de pertença, como é apresentado na Figura 48. Esta interface gráfica pode apresentar de forma mais clara, o processo de inferência, comparativamente aos outros formatos indicados anteriormente.

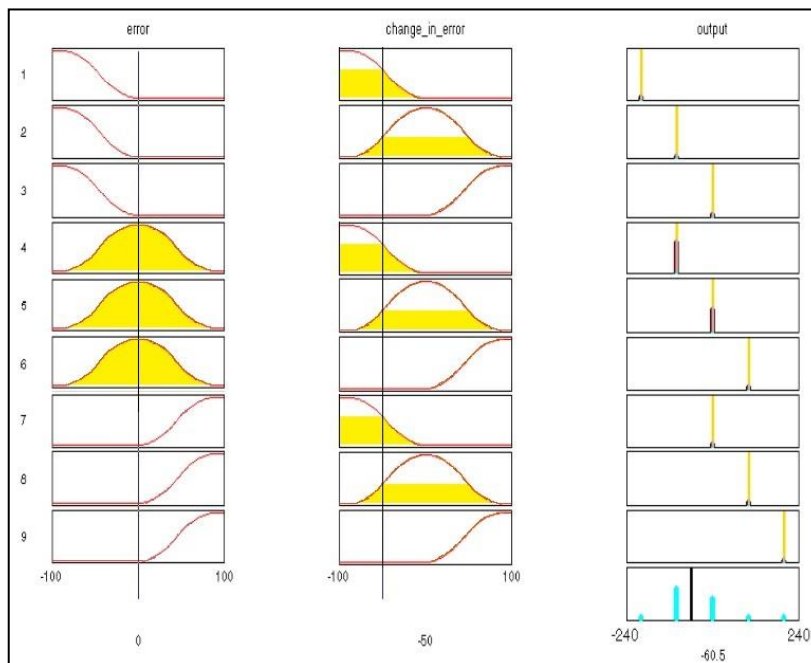


Figura 48 – Construção gráfica de um sinal de controlo, num controlador PD difuso [32].

Na Figura 48, cada uma das linhas é referente a uma regra. Por exemplo, a primeira linha indica que se o erro é negativo (linha 1, coluna 1) e a alteração ao erro é negativa (linha 1, coluna 2), a saída deve ser negativa (linha 1, coluna 3).

3.10 CONTROLADORES *STANDARD* DE LÓGICA DIFUSA

Um controlador de lógica difusa consiste num conjunto de regras na forma seguinte:

SE (condições são validas) *ENTÃO* (consequências podem ser inferidas)

Uma vez que os antecedentes e os consequentes das regras "SE-ENTÃO" estão associados a conceitos difusos (termos linguísticos), eles são denominados por: afirmações difusas condicionais. Na terminologia dos controladores lógicos difusos, uma regra de controlo difusa é uma afirmação difusa condicional em que o antecedente é a condição no seu domínio aplicacional, e o consequente é a ação de controlo para o sistema a controlar. As entradas dos sistemas baseados em regras, devem ser efetuadas por conjuntos difusos, e portanto, é necessário difundir as entradas rígidas. Além disso, a saída de um sistema difuso é sempre um conjunto difuso, e portanto, para obter um valor real rígido, temos que colapsá-lo. Normalmente, os sistemas de controlo difuso consistem em quatro partes principais: Interface de difusão, definição de regras difusas, motor de inferência difusa e interface de colapsagem, como apresentado pela Figura 49 [33].

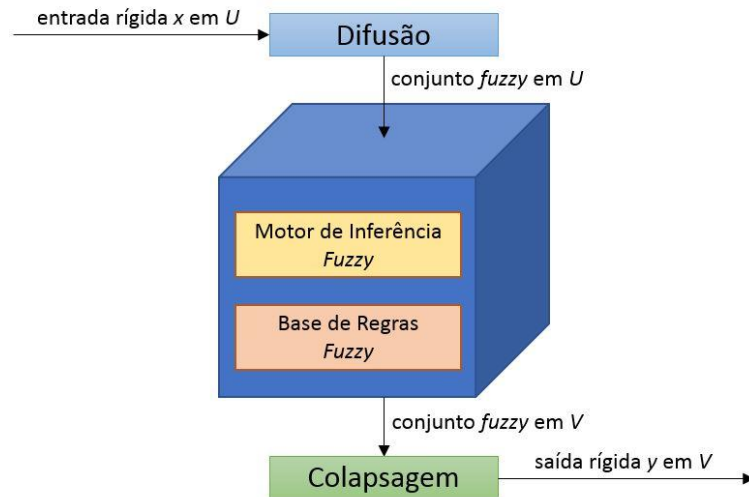


Figura 49 – Controlador lógico difuso.

3.10.1 MÓDULO DE DIFUSÃO

O primeiro módulo de um controlador lógico difuso é o módulo de difusão, Figura 50, e envolve os seguintes passos:

- recebe os valores das variáveis de entrada,
- realiza um mapeamento de escala que transfere o intervalo dos valores das variáveis de entrada para universos de discurso correspondentes,
- realiza a função de difusão, que converte os dados de entrada em valores linguísticos adequados, que podem ser vistos como etiquetas de conjuntos *fuzzy*.

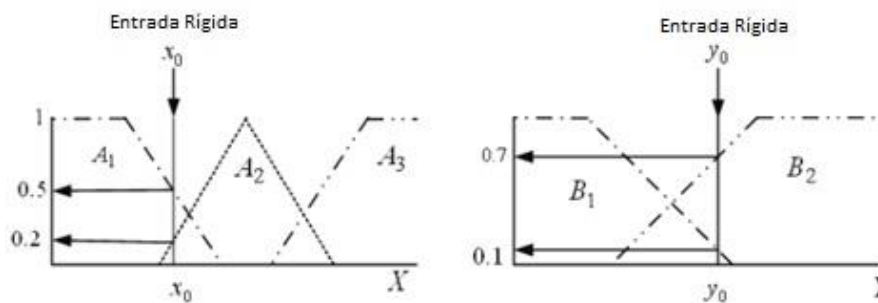


Figura 50 – Difusão [33].

O primeiro passo é recolher as entradas, x_0 e y_0 , e determinar o grau de pertença de cada entrada, a cada um dos conjuntos difusos. De acordo com a Figura 50, podemos por exemplo concluir que [31] :

$$\mu_{A_1}(x_0) = 0,5, \mu_{A_2}(x_0) = 0,2, \mu_{B_1}(y_0) = 0,1, \mu_{B_2}(y_0) = 0,7 \quad (3.62)$$

3.10.2 REGRAS DE BASE E MOTOR DE INFERÊNCIA DIFUSA

A regra de base do motor de inferência difusa compreende o conhecimento do domínio da aplicação e os objetivos de controlo a atingir. Esta consiste numa "base de dados" e numa "base de regras de controlo linguístico difuso", onde:

- a) a base de dados fornece as definições necessárias, que são usadas para definir as regras linguísticas de controlo e a manipulação de dados difusos num controlador lógico difuso;
- b) a regra de base caracteriza os objetivos e a política de controlo dos especialistas nesse domínio, através de regras linguísticas de controlo.

O motor de regras difusas é o *kernel* de um controlador lógico difuso. Este tem a capacidade de simular a decisão do ser humano baseado nos conceitos difusos, e inferir ações de controlo difusos, empregando implicações difusas e regras de inferência na lógica difusa.

As entradas do sistema *fuzzy* são aplicadas aos antecedentes das regras difusas. Se uma dada regra difusa possui múltiplos antecedentes, o operador difuso (E ou OU) é utilizado para obter um único valor que representa o resultado da avaliação antecedente. Para avaliar a disjunção da regra antecedente, utiliza-se a operação difusa OU. Tipicamente, é utilizada a operação de união difusa clássica:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{Max}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.63)$$

Da mesma forma, para avaliar a conjunção dos antecedentes da regra, é aplicada a operação de interseção difusa:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{Min}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (3.64)$$

O resultado é dado pela Figura 51 [33].

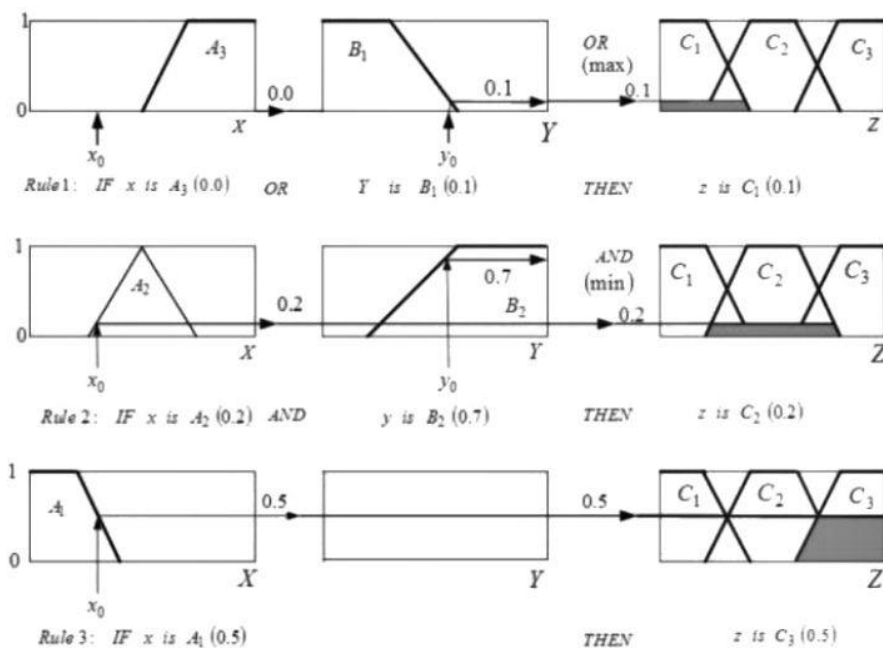


Figura 51 – Regras de avaliação [33].

As funções de pertença de todas as regras consequentes, que foram anteriormente unidas e redimensionadas, são combinadas num único conjunto difuso, como pode ser verificado na Figura 52.

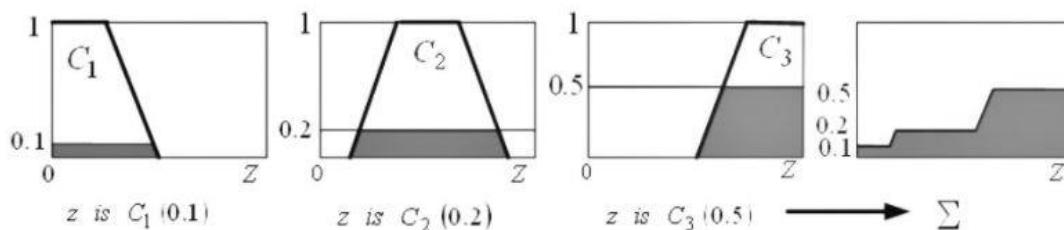


Figura 52 – Agregação das regras de saída [33].

3.10.3 MÓDULO DE COLAPSAGEM

O módulo de colapsagem executa as funções seguintes, Figura 53:

- mapeamento de escala, que converte o intervalo de valores das variáveis de saída, em universos de discurso correspondentes;
- colapsagem, que produz uma ação de controlo não difusa, através de uma ação de controlo difusa inferida.

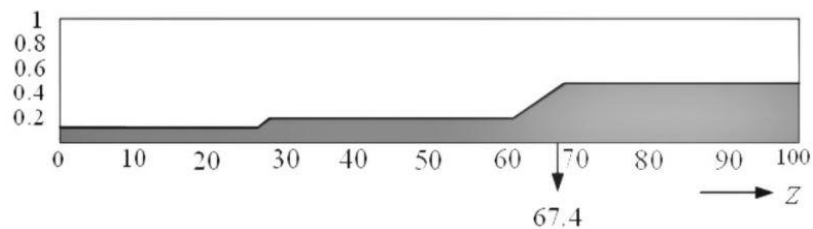


Figura 53 – Colapsagem [33].

O método de colapsagem mais popular é o de técnica centróide. Este método consiste em encontrar um ponto que representa o centro de gravidade do conjunto difuso agregado A, no intervalo [a, b]. Uma estimativa razoável pode ser obtida, calculando-o através de uma amostra de pontos. De acordo com a Figura 53, neste caso resulta:

Método centróide de colapsagem:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \min \{ \mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y) \}}{\sum_{i=1}^n \min \{ \mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y) \}} \quad (3.65)$$

então,

$$\begin{aligned} z &= COG \\ &= \frac{0.1(0 + 10 + 20) + 0.2(30 + 40 + 50 + 60) + 0.5(70 + 80 + 90 + 100)}{0.1 + 0.1 + 0.1 + 0.2 + 0.2 + 0.2 + 0.2 + 0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.5} \\ &= 67.4 \end{aligned} \quad (3.66)$$

3.10.4 CONTROLADOR DE MAMDANI

A ideia principal do controlador de Mamdani é descrever o estado do processo através da utilização de variáveis linguísticas, e utilizar essas variáveis como entradas para controlar as regras. Começa-se por definir os termos das variáveis de entrada. A variável base é uma variável de entrada, que pode ser medida ou derivada de um sinal medido, ou uma variável de saída do controlador. Num sistema de aquecimento, por exemplo, as variáveis de base possíveis são: a temperatura da divisão, a alteração da temperatura na divisão, o número de janelas abertas, a temperatura exterior, a alteração da potência, etc. Este exemplo ilustra que o número de sinais de entrada está longe de ser óbvio. Os termos das variáveis linguísticas são representados por conjuntos *fuzzy* com uma determinada forma. Os conjuntos *fuzzy* mais populares são os de forma triangular e trapezoidal, conforme já referido, devido à eficiência computacional. A variável linguística “temperatura” pode, por exemplo, consistir nos termos “muito baixa” (mb), “baixa” (b), “confortável” (c), “alta” (a) e “muito alta” (ma), como demonstrado na Figura 54 [34].

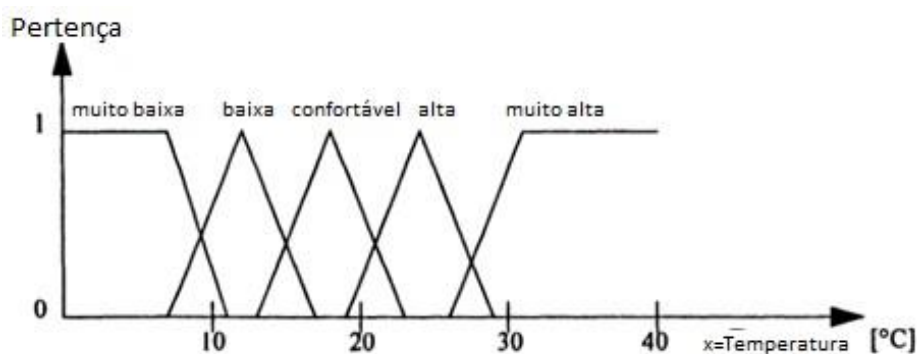


Figura 54 – Representação dos conjuntos de restrição da variável linguística “temperatura” [34].

Formalmente, são descritos os termos de cada variável linguística VL_1, \dots, VL_n , pelas suas funções de pertinência $\mu_i^j(x)$, onde i representa a variável linguística, $i = 1, \dots, n$, e j representa o termo da variável linguística i , $j = 1, \dots, m(i)$, e $m(i)$ é o número de termos de cada variável linguística i . O número de variáveis e o número de termos de cada variável linguística, determina o número de regras possíveis. Na maioria das aplicações, alguns

estados podem ser ignorados seja porque são impossíveis ou porque a ação de controlo não iria ser vantajosa.

As regras interligam as variáveis de entrada com as variáveis de saída, e são baseadas na descrição do estado *fuzzy* que é obtido pela definição das variáveis linguísticas. Formalmente, as regras podem ser escritas como:

Regra r: se x_1 é $A_1^{j_1}$ e x_2 é $A_2^{j_2}$ e ... e x_n é $A_n^{j_n}$, então u é A^j

onde $A_i^{j_i}$ é o j termo da variável linguística i , correspondendo à função de pertença $\mu_i^{j_i}(x_i)$, e A^j corresponde à função de pertença $\mu^j(u)$, representando o termo da variável da ação de controlo. Como exemplo de uma regra para o sistema de aquecimento temos:

Se “temperatura” é “baixa” e “alteração_na_temperatura” é “negativa baixa”, então
potência é média

Tabela 5 – Base de regras [34].

	alteração_da_temperatura	negativo alto (na)	negativo baixo (nb)	zero (z)	positivo baixo (pb)	positivo alto (pa)
temperatura	muito baixa	-	alta	alta	média	média
	baixa	alta	média	média	-	-
	confortável	-	média	-	-	-
	alta	-	-	-	-	-
	muito alta	média	-	-	-	-

As regras de base em sistemas com duas entradas e uma saída, podem ser visualizados através de uma tabela de regras, onde as linhas e as colunas são dispostas de acordo com os termos das variáveis de entrada, e o resultado dos cruzamentos de ambas as entradas são as consequências da regra, conforme a Tabela 5. A primeira posição da tabela,

resultante do cruzamento do estado das entradas – “temperatura” muito baixa, com “alteração_da_temperatura” negativo alto – refere-se a um estado onde a temperatura é muito baixa e desce rapidamente. Como o sistema de aquecimento tem potência limitada, mesmo utilizando a potência máxima, não levaria a temperatura para um estado confortável. A regra que aponta para esta situação é ignorada. Deve-se, no entanto, definir um valor padrão de saída, se nenhuma das regras for acionada [34].

A definição das regras e variáveis linguísticas é a componente principal quando se implementa um controlador de Mamdani. O núcleo computacional pode ser descrito como um processo de três passos, consistindo em:

1. Determinar o grau de pertença da entrada, na regra antecedente;
2. Computação das consequências das regras;
3. Agregação das consequências das regras à ação de controlo do conjunto *fuzzy*.

O primeiro passo serve para calcular os graus de pertença dos valores de entrada nos antecedentes da regra. Aplicando o operador mínimo como modelo para “E”, o cálculo do grau de pertença da regra r é dado por:

$$\alpha_r = \min_{i=1,\dots,n} \{ \mu_i^{j_i}(x_i^{input}) \} \quad (3.67)$$

Este conceito permite obter a validade das consequências da regra. É assumido que as regras do antecedente com baixo grau de pertença também possuem uma pequena validade e, portanto, limitam os conjuntos *fuzzy* consequentes à altura do grau de pertença antecedente. Então,

$$\mu_r^{conseq}(u) = \min\{\alpha_r, \mu^j(u)\} \quad (3.68)$$

O resultado deste processo de avaliação é obtido pela agregação de todas as consequências, utilizando o operador máximo. É calculado o conjunto *fuzzy* da ação de controlo, através da seguinte expressão:

$$\mu^{conseq}(u) = \max_r \{ \mu_r^{conseq}(u) \} \quad (3.69)$$

4. MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM CONTROLADOR DIFUSO COM BASE EM RECURSOS RENOVÁVEIS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo visa explicar o modelo de simulação de um controlador difuso de um pequeno sistema de produção de energia, desenvolvido utilizando recursos renováveis. O modelo de simulação foi elaborado recorrendo ao *software* MATLAB 2019b, utilizando a ferramenta de desenvolvimento de interface gráfica MATLAB *App Designer*, e as bibliotecas *Fuzzy Logic Designer* e Simulink para a manipulação e simulação do controlador lógico

difuso. O controlador utiliza a informação proveniente de ficheiros no formato “.csv”, adquiridos na plataforma *web* do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) - <https://snirh.apambiente.pt/> -, e utiliza esses dados como entradas do controlador difuso. Após o controlador gerar as saídas provenientes do controlo difuso, esses resultados são avaliados e é definido que sistemas vão operar - se o sistema fotovoltaico, se o sistema eólico, ou ambos – e se existe a produção de energia em excesso, a qual deva ser devolvida à rede. Este estado de operação é apresentado graficamente pela aplicação desenvolvida.

Nas subsecções seguintes vai ser apresentado o controlador desenvolvido, aproveitando também para explicar o funcionamento da *toolbox* do controlo *Fuzzy*.

4.2 MATLAB: FUZZY LOGIC TOOLBOX

O MATLAB é um *software* que permite auxiliar o desenvolvimento de sistemas e produtos. A sua linguagem *matrix-based* é classificada como a forma natural de expressar a matemática computacional. O MATLAB possui ainda diversas ferramentas de visualização de dados, que permitem ter uma melhor perceção destes. O código MATLAB pode ser integrado com outras linguagens, permitindo implementar algoritmos e aplicações em sistemas *web*, empresariais e de sistemas de produção [35].

Para este trabalho, recorre-se à utilização da *fuzzy logic toolbox*, que permite criar e editar sistemas de inferência. Os sistemas de inferência podem ser criados utilizando ferramentas gráficas ou recorrendo a funções da linha de comandos. O MATLAB dispõe ainda de uma ferramenta, o Simulink, o qual permite ao utilizador testar o sistema *fuzzy* num ambiente de simulação de diagramas de blocos. A estrutura do *software* MATLAB com *fuzzy logic toolbox* pode ser representada pela Figura 55. A *fuzzy logic toolbox* permite ainda que o utilizador execute diretamente as suas próprias aplicações em linguagem de programação C. Esta funcionalidade é possível devido a um motor de inferência *fuzzy* que lê os sistemas *fuzzy* que foram gravados através de uma sessão MATLAB. É possível customizar este motor de inferência para construir uma inferência *fuzzy* no próprio código desenvolvido pelo utilizador [36].

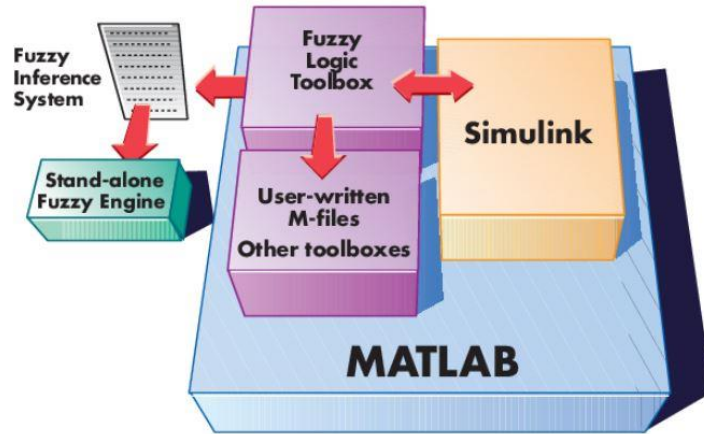


Figura 55 – Estrutura do MATLAB com a *fuzzy logic toolbox* [36].

4.3 CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE INFERÊNCIA DIFUSA (FIS)

Para a construção de um FIS recorrendo à *fuzzy logic toolbox*, o MATLAB dispõe de um conjunto de módulos que permitem a criação, edição e visualização dos FIS.

O primeiro módulo é denominado por “*Fuzzy Logic Designer*”, o qual permite definir o número de variáveis de entrada e de saída do sistema, bem como as características dessas variáveis, conforme apresentado na Figura 56.

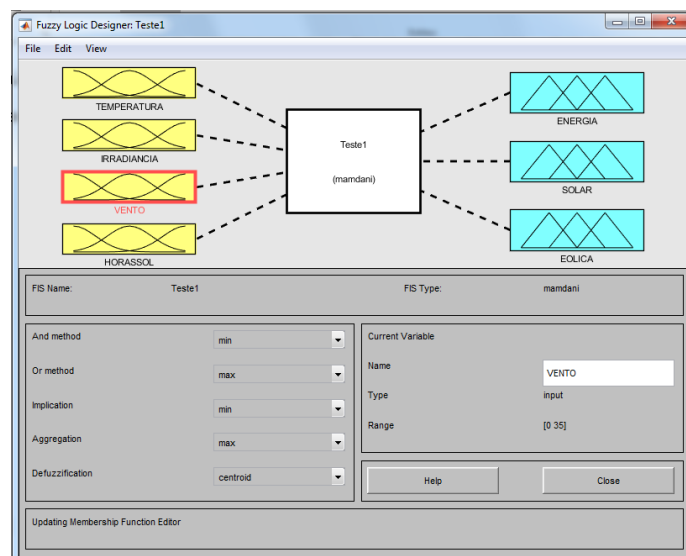


Figura 56 – Apresentação do módulo Fuzzy Logic Designer do *software* MATLAB.

Nesta figura é possível verificar que foram criadas quatro variáveis de entrada do sistema, e três variáveis de saída, as quais serão mais à frente apresentadas, formando a base para o desenvolvimento do controlador.

No menu “*Fuzzy Logic Designer*”, é ainda possível efetuar o ajuste das funções de inferência e do método de colapsagem do resultado da inferência, e aceder aos diversos módulos de configuração do modelo *fuzzy*. Através da barra de menus, e seleccionando o menu “*Edit*”, é possível adicionar variáveis de entrada e de saída, configurar as funções de pertença das variáveis escolhidas, e aceder ao menu de definição de regras, Figura 57.

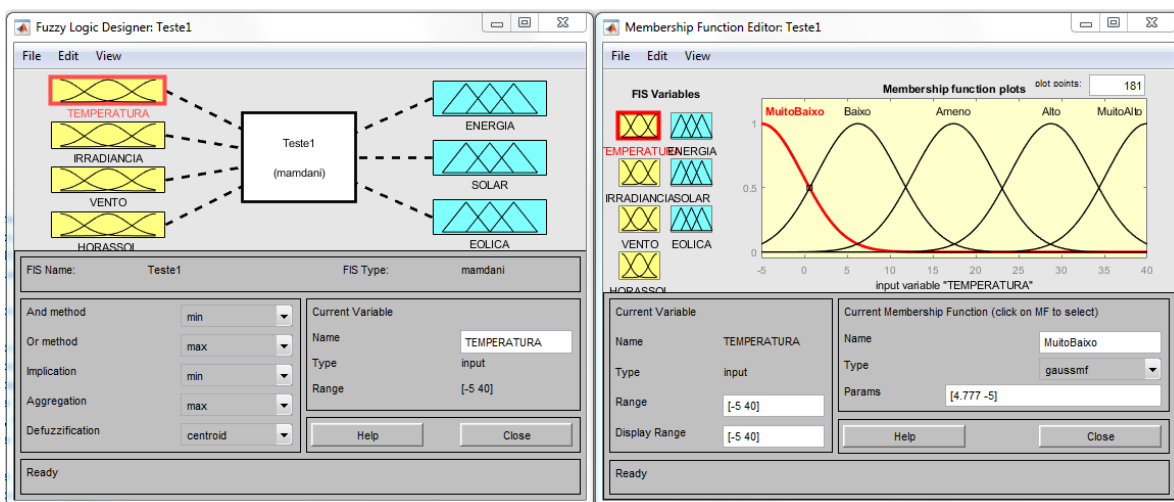


Figura 57 – Apresentação do módulo de edição das funções de pertença das variáveis escolhidas.

Após a definição das funções de pertença de entrada e de saída, é necessário definir o conjunto de regras compostas por essas mesmas variáveis.

4.4 DESENHO DO SISTEMA DE CONTROLO

4.4.1 COMPONENTE LÓGICA DIFUSA

Para o desenho do controlador difuso *Fuzzy Renewable Energy Controller* (FREC), foram aplicados os conceitos da lógica difusa. Para tal, foram definidas as variáveis de entrada, de saída e os seus conjuntos difusos, bem como as regras de avaliação dos parâmetros, para que fosse possível produzir um valor de saída aproximado ao cálculo teórico.

No início do desenvolvimento do sistema foram definidas as variáveis linguísticas do controlador. A temperatura do ar, em graus centígrados (TEMPERATURA), a radiação, em *watts* por metro quadrado (IRRADIANCIA), a velocidade do vento, em metros por segundo, (VENTO) e o consumo de energia na rede, em *watts* (CONSUMO) constituem as variáveis de entrada. Como variáveis de saída considerou-se a energia produzida pelo sistema fotovoltaico, em *watts* (SOLAR), a energia produzida pelo sistema eólico, em *watts* (EOLICA) e a energia devolvida à rede, em *watts* (REDE).

Tabela 6 – Entradas e saídas do controlador difuso.

Variável de Entrada	Intervalo	Variável de Saída	Intervalo
TEMPERATURA	[-5, 40]	SOLAR	[0, 435]
IRRADIANCIA	[0, 1200]	EOLICA	[0, 940]
VENTO	[3, 27]	REDE	[0, 1375]
CONSUMO	[0, 1375]		

Após a definição das variáveis de entrada e de saída, foram definidos os seus intervalos mínimos e máximos dos seus conjuntos difusos. Como exemplo, para a TEMPERATURA, foi definido o valor -5 para o limite mínimo do valor de entrada, e 40 para o limite máximo –

TEMPERATURA [-5 40]. Os valores para as restantes variáveis linguísticas foram definidos de acordo com a Tabela 6.

Definidas as variáveis linguísticas e os respetivos intervalos que vão ser colocados no controlador, é necessário definir os conjuntos difusos de cada variável linguística. A Tabela 7 mostra os conjuntos que foram atribuídos a cada variável.

Tabela 7 – Informação dos conjuntos difusos das variáveis linguísticas.

Variável linguística	Número de conjuntos difusos	Conjuntos difusos
TEMPERATURA	5	Muito Baixo, Baixo, Ameno, Alto, Muito Alto
IRRADIANCIA	5	Muito Fraco, Fraco, Médio, Alto, Muito Alto
VENTO	5	Muito Fraco, Fraco, Médio, Alto, Muito Alto
CONSUMO	5	Muito Baixo, Baixo, Moderado, Alto, Muito Alto
SOLAR	5	Muito Pouco, Pouco, Suficiente, Alto, Muito Alto
EOLICA	5	Muito Pouco, Pouco, Suficiente, Alto, Muito Alto
REDE	9	mf1, mf2, mf3, mf4, mf5, mf6, mf7, mf8, mf9

No caso da rede, os conjuntos difusos, mf1:..., mf9, dizem respeito a Muito Pouco, Pouco, Médio Pouco, Pequeno Pouco, Suficiente, Pequeno Alto, Médio Alto, Alto, Muito Alto, respetivamente, os quais devido à extensão da designação, não foram incluídos no próprio modelo do controlador.

A *toolbox* da lógica difusa do MATLAB pode ser iniciada utilizando a linha de comandos da aplicação, ou através do atalho *Fuzzy Logic Designer*. Através da linha de comandos basta escrever o comando “*fuzzy*”, conforme a Figura 58.



Figura 58 – Linha de Comandos do software MATLAB 2019b.

A aplicação pode ainda ser iniciada, recorrendo ao atalho presente no separador “APPS”, que pode ser acedido através da barra de menus do software, como indica na Figura 59.

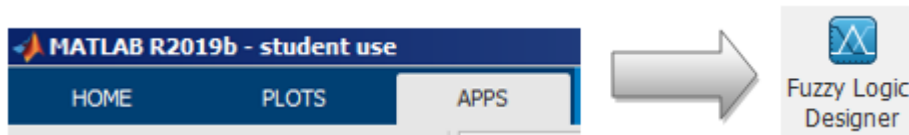


Figura 59 – Esquema de acesso à aplicação Fuzzy Logic Designer do software MATLAB 2019b.

Iniciada a aplicação, cujo aspeto é visível na Figura 60, é necessário criar as variáveis linguísticas definidas anteriormente.

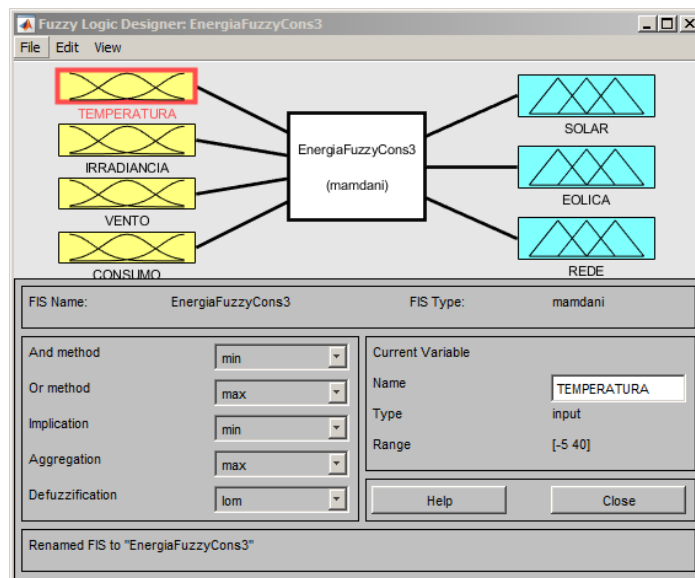


Figura 60 – Módulo da biblioteca Fuzzy Logic Designer.

Para a criação das variáveis linguísticas de entrada é necessário abrir o separador “Edit”, escolher a opção “Add Variable”, e escolher a opção *Input*, para adicionar uma variável de entrada, e *output*, para adicionar uma variável de saída, conforme a Figura 61.

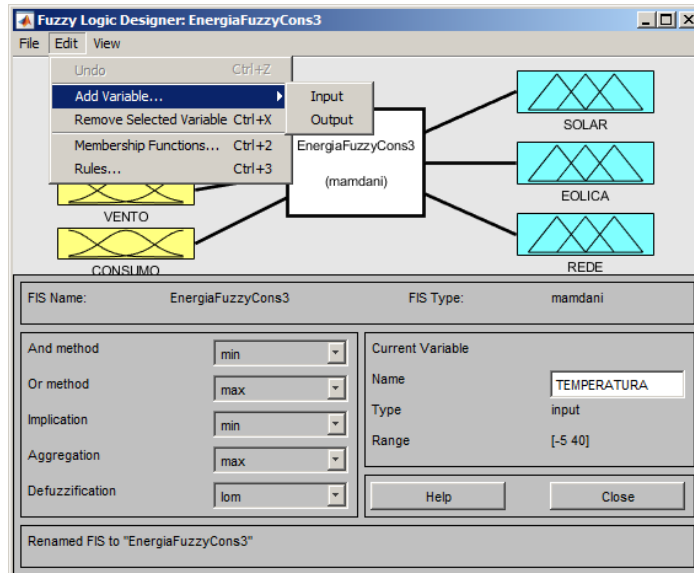


Figura 61 – Menu para a criação de variáveis linguísticas de entrada e de saída.

4.4.1.1 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS DIFUSAS DO SISTEMA

Para este controlador, foram definidas utilizando este processo, as entradas TEMPERATURA, IRRADIANCIA, VENTO e CONSUMO, e as saídas, SOLAR, EOLICA e REDE.

O campo “Name”, presente na página principal da aplicação, permite ao utilizador definir o nome de cada variável. Ao fazer duplo clique com o rato, no retângulo associado a qualquer uma das variáveis (amarelo para entradas, e azul para saídas do controlador difuso), é dado acesso à janela de edição das funções de pertença (*Membership Function Editor*). Neste módulo de edição, é possível definir o tipo de conjunto difuso (gaussiano, triangular, trapezoidal, entre outros), o nome de cada conjunto difuso (por exemplo: Muito baixo e Baixo) e o intervalo de valores possíveis à entrada do controlador. Além da classificação dos conjuntos, é possível adicionar ou remover conjuntos difusos, como verificado pela Figura 62. O número de conjuntos de entrada e de saída, para cada variável linguística, está limitado a nove conjuntos.

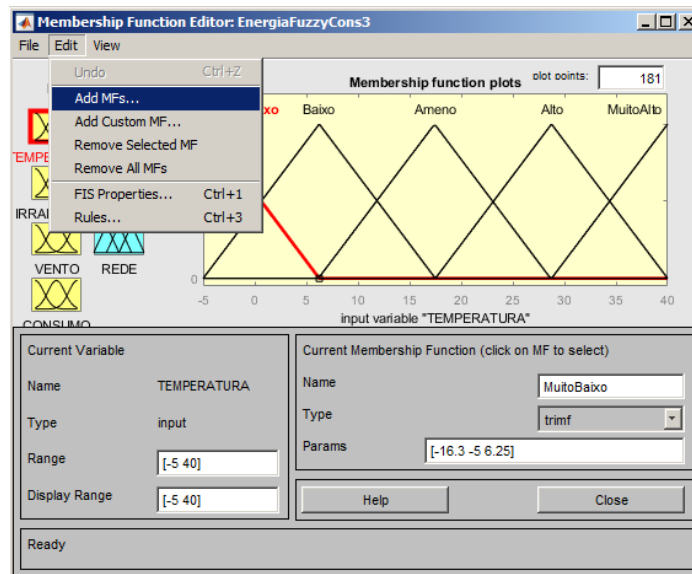


Figura 62 – Editor de funções de pertinência.

No desenvolvimento deste controlador foi utilizada a variável de entrada difusa TEMPERATURA, dividida em cinco conjuntos, sendo eles: Muito Baixo, Baixo, Ameno, Alto e Muito Alto. O controlador avalia qualquer valor de temperatura compreendido entre -5 C e 40 C . A definição dos parâmetros da variável “TEMPERATURA” pode ser observada na Figura 63.

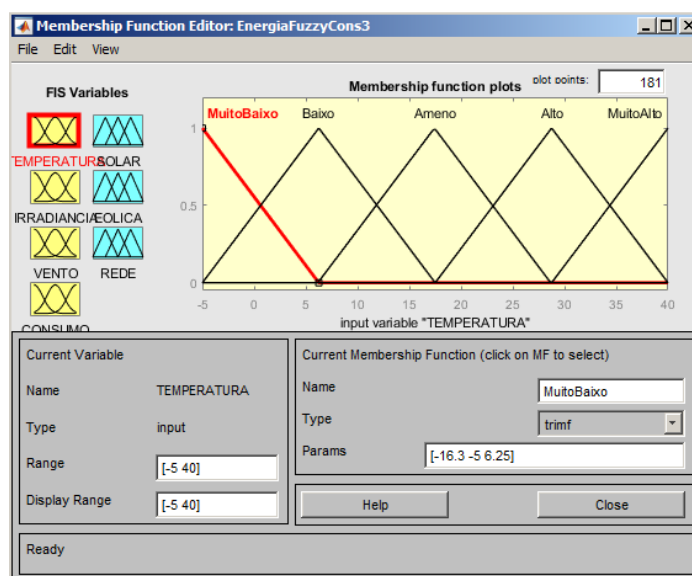


Figura 63 – Variável linguística difusa da entrada TEMPERATURA.

A variável IRRADIANCIA, representa a potência radiante que incide sobre a superfície do painel solar (irradiância). Esta pertence ao grupo das variáveis de entrada difusas, e é dividida em cinco conjuntos difusos triangulares, visíveis na Figura 64.

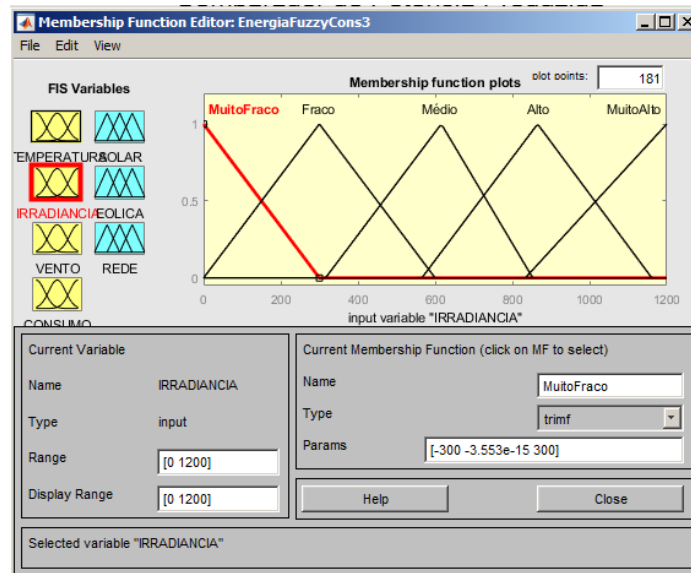


Figura 64 – Variável linguística difusa de entrada IRRADIANCIA.

Os conjuntos difusos para a variável IRRADIANCIA foram denominados de Muito Fraco, Fraco, Médio, Alto e Muito Alto. O intervalo escolhido para os valores de IRRADIANCIA de entrada no sistema variam entre 0 e 1200 W/m². A maior componente da variável de saída SOLAR será afetada pelos valores de entrada de IRRADIANCIA.

A Figura 65 tem representada a parametrização da variável linguística de entrada VENTO. A variável VENTO foi definida por cinco conjuntos difusos que, tal como na variável IRRADIANCIA, foram denominados por Muito Fraco, Fraco, Médio, Forte e Muito Forte. Estes conjuntos difusos, abrangem um intervalo de valores de velocidade do vento entre os 3 e 27 m/s.

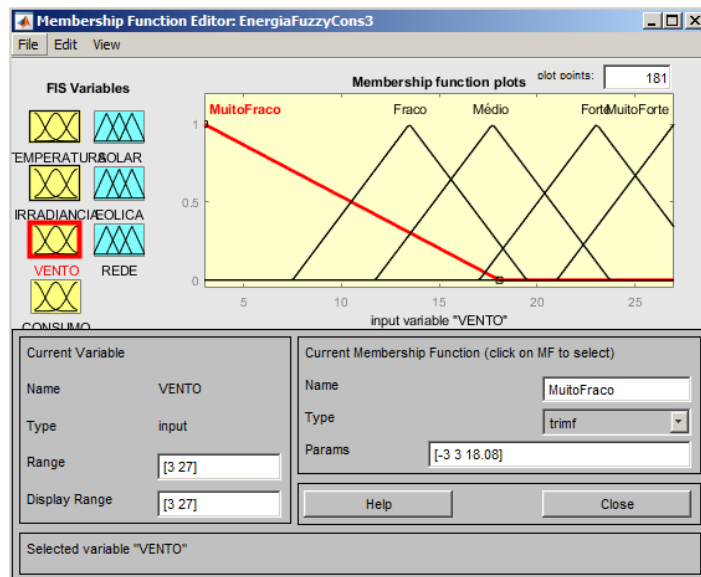


Figura 65 – Variável linguística difusa de entrada VENTO.

A última variável do controlador difuso a ser definida é o CONSUMO. Esta variável representa o consumo do sistema alimentado pela energia solar e eólica. O CONSUMO varia entre 0 e 1375 W, que é o valor total produzido pelas fontes de energia renováveis que foram escolhidas para esta simulação, Figura 66.

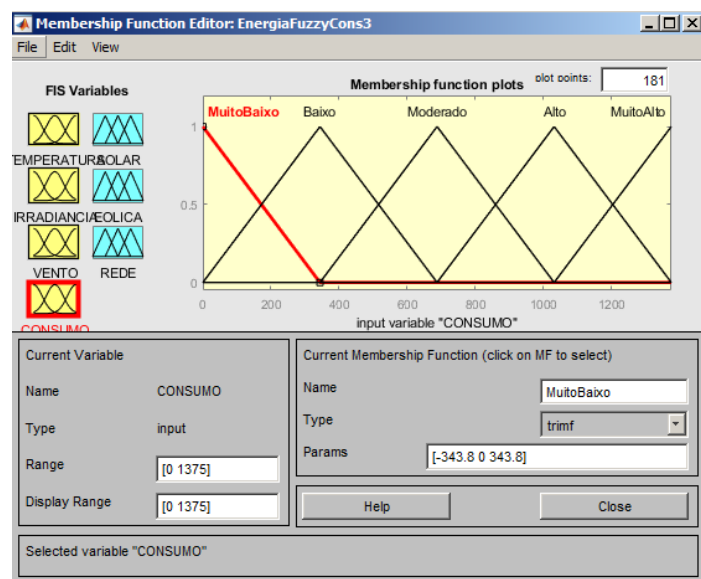


Figura 66 – Variável linguística difusa de entrada CONSUMO.

A primeira variável de saída definida é a SOLAR. Na Figura 67 é possível verificar os conjuntos difusos para quantificação desta variável, que são: Muito Pouco, Pouco, Suficiente, Alto e Muito Alto, cuja função é a representação da potência gerada pelo painel fotovoltaico, e apresenta resultados com valores entre 0 e 435.

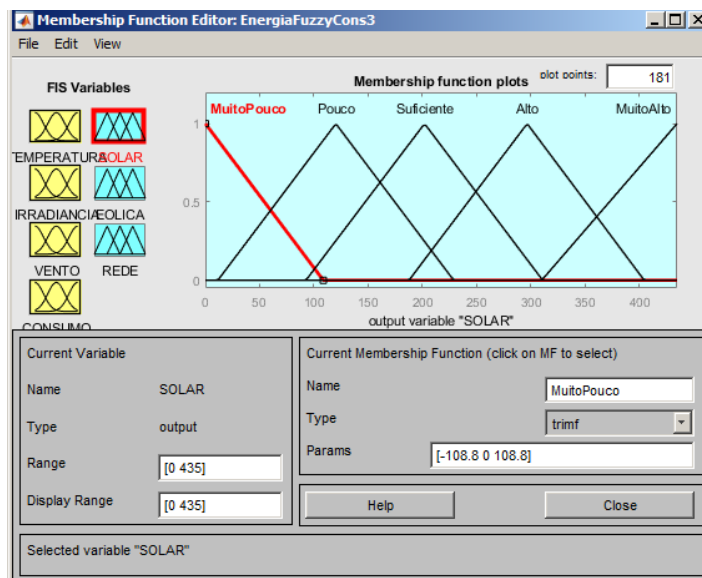


Figura 67 – Variável linguística difusa de saída SOLAR.

Da mesma forma que a variável SOLAR, também a variável EÓLICA tem definidos 5 conjuntos difusos: Muito Pouco, Pouco, Suficiente, Alto e Muito Alto. Esta variável de saída tem por função a representação da potência gerada pelo aerogerador. Os conjuntos difusos da variável EÓLICA são do tipo triangular e, os valores de saída variam entre 0 e 940, visível na Figura 68.

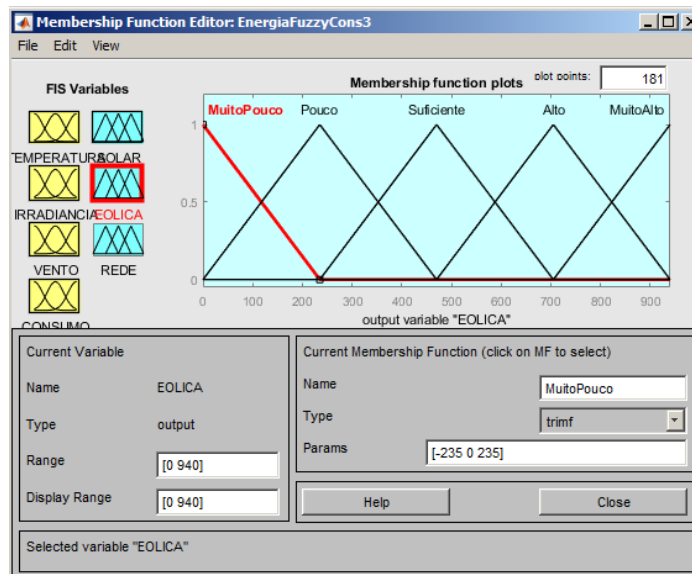


Figura 68 – Variável linguística difusa de saída EOLICA.

Por último, a variável de saída REDE representa a potência excedente devolvida à rede, quando a necessidade de consumo do sistema a alimentar é inferior à potência produzida pelas fontes de energia renovável. A variável REDE é dividida em 9 conjuntos difusos: mf1, mf2, mf3, mf4, mf5, mf6, mf7, mf8 e mf9. Os valores de saída estão compreendidos entre 0 e 1375. A Figura 69 mostra os parâmetros de configuração para a variável REDE.

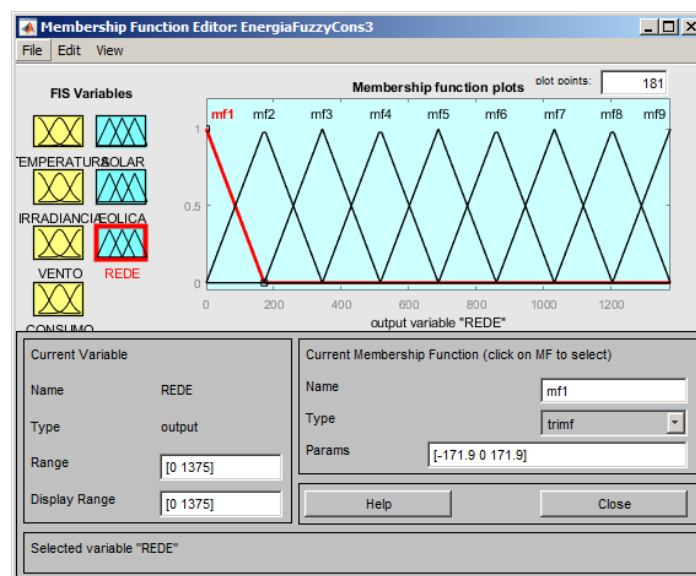


Figura 69 – Variável linguística difusa de saída REDE.

A avaliação por parte do controlador *fuzzy*, pode ser consultada num ambiente gráfico disponível pela aplicação, através do separador “View”, e seleccionada a opção “Surface”, Figura 70. Neste caso, é apresentado um gráfico que representa o resultado da variável de saída SOLAR, para os diferentes valores das variáveis de entrada IRRADIANCIA e TEMPERATURA.

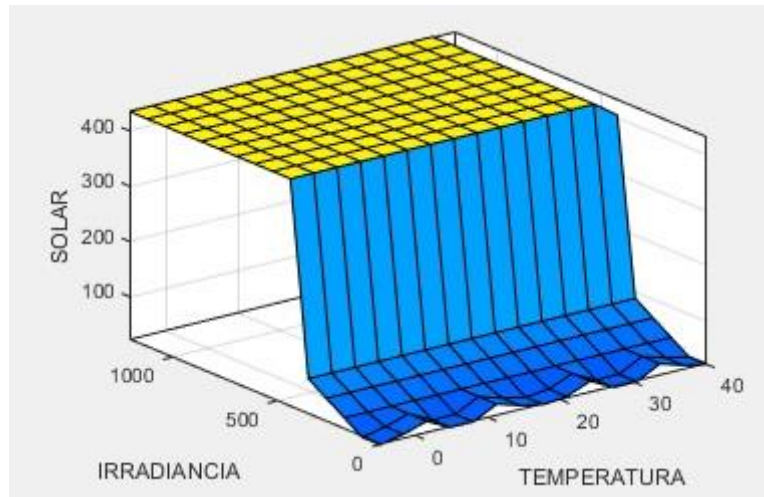


Figura 70 – Gráfico dos resultados *fuzzy* da variável de saída SOLAR, face aos valores das entradas IRRADIANCIA e TEMPERATURA.

4.4.2 MODELO DO CONTROLADOR EM SIMULINK

O modelo de avaliação difusa está inserido num modelo de simulação, criado com a ferramenta Simulink, que recolhe os dados das variáveis de entrada através da leitura de ficheiros no formato “.csv”, extraídos de uma base de dados *web* – SNIRH. O Simulink é um *add-on* do MATLAB que permite ao utilizador desenvolver modelos de controlo de forma intuitiva, devido à sua construção através de blocos de funções. No desenvolvimento deste projeto, o Simulink tem a função de leitura das variáveis de entrada do controlador difuso, através da leitura de variáveis da *Workspace* do projeto MATLAB, e a construção de tabelas com os valores de saída, que serão posteriormente apresentados na GUI (*Graphic User Interface*). Como tal, podemos dividir o modelo Simulink em quatro secções:

- Aquisição de valores das variáveis de entrada;
- Cálculo teórico da potência gerada pelos sistemas;
- Avaliação do controlador difuso;
- Armazenamento dos resultados teórico e difuso;

A aquisição dos valores teóricos é executada através da função “*From Workspace*”, que lê os dados de uma tabela gerada previamente pela parte computacional da aplicação gráfica. Cada valor presente numa linha da tabela lida, é utilizado para gerar um resultado de uma iteração da simulação. As funções de leitura da tabela, estão denominadas por *Consumption*, *WindSpeed*, *Temperature* e *Irradiancy* na Figura 71.

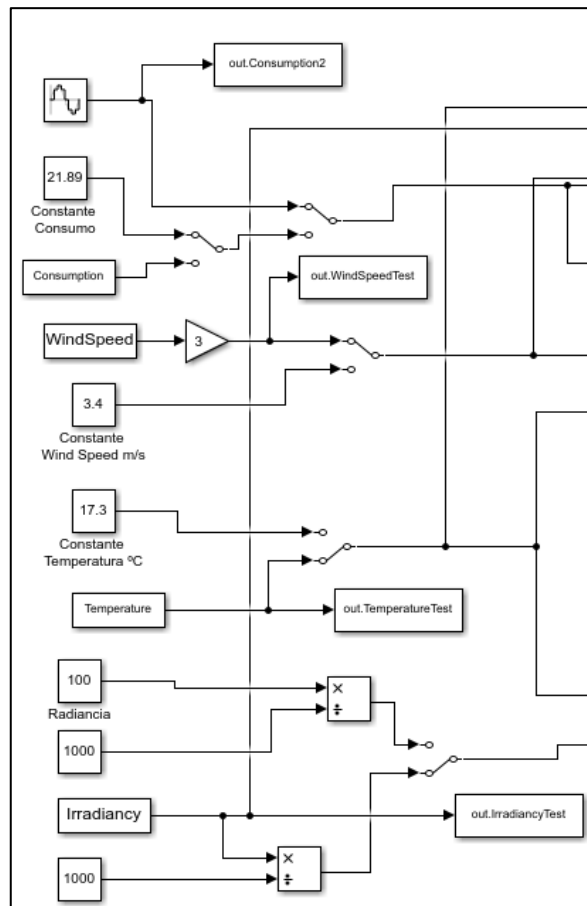


Figura 71 – Apresentação das funções de leitura dos dados de uma tabela, no módulo de simulação Simulink.

Após a leitura dos valores das variáveis de entrada do modelo difuso, a simulação divide-se em duas partes: o cálculo teórico da potência de saída dos sistemas eólico e solar, e a avaliação pelo modelo difuso. O cálculo teórico é feito para os dois subsistemas apresentados na Figura 72.

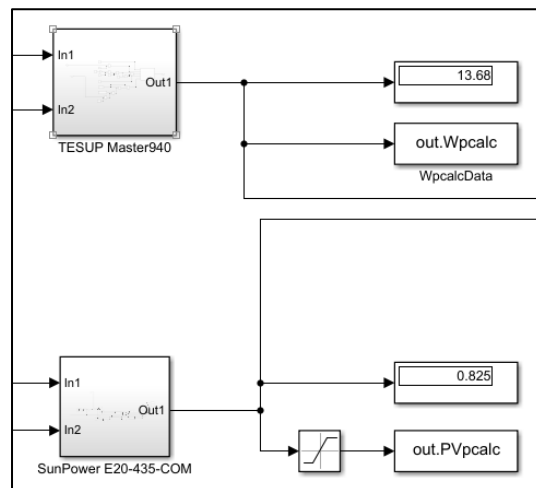


Figura 72 – Subsistemas para cálculo das potências eólica e solar.

O subsistema “TESUP Master940”, para cada iteração da simulação, coloca na saída o resultado da equação (2.2), e o subsistema “SunPower E20-435-COM”, o resultado da equação (2.8), que podem ser consultados em detalhe no Anexo A.

O bloco do modelo difuso possui uma entrada e uma saída, Figura 73. No entanto, à entrada do bloco, é colocado um *Multiplex (Mux)*, para compactar os valores das variáveis de entrada, e assim poderem ser avaliados pelo controlador. Na saída, para obtermos os valores correspondentes às variáveis de saída do controlador difuso, resultantes da colapsagem, é colocado um *Desmultiplex (Demux)*.

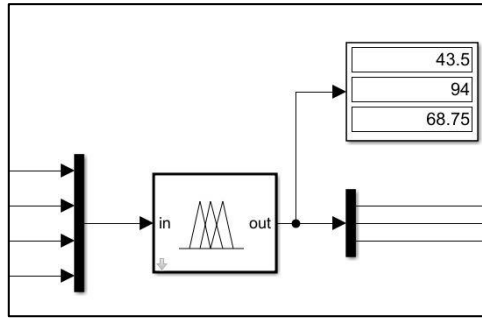


Figura 73 – Módulo controlador difuso no ambiente Simulink.

Por fim, os resultantes da avaliação difusa e os valores calculados teoricamente, são colocados em variáveis para serem lidos pela GUI, e apresentados os resultados comparativos da potência calculada e da potência obtida pelo controlador *fuzzy*. A função “*To Workspace*” é utilizada para gravar os resultados de saída. Um exemplo do bloco da função pode ser verificado na Figura 74.

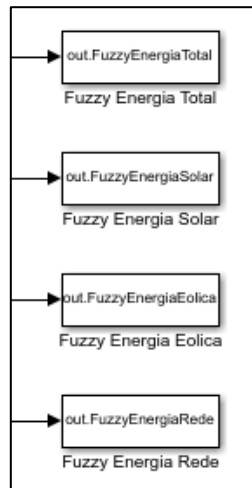


Figura 74 – Exemplo de utilização da função “*To Workspace*”, para armazenamento dos valores resultantes da simulação.

4.4.3 INTERFACE GRÁFICA FREC

Para a aquisição dos dados relativos às variáveis de entrada do controlador *fuzzy*, e para a apresentação dos resultados da resposta do controlador, foi desenvolvida uma interface gráfica. Na Figura 75 é possível verificar a aparência da aplicação, bem como as diversas funções por ela permitidas.

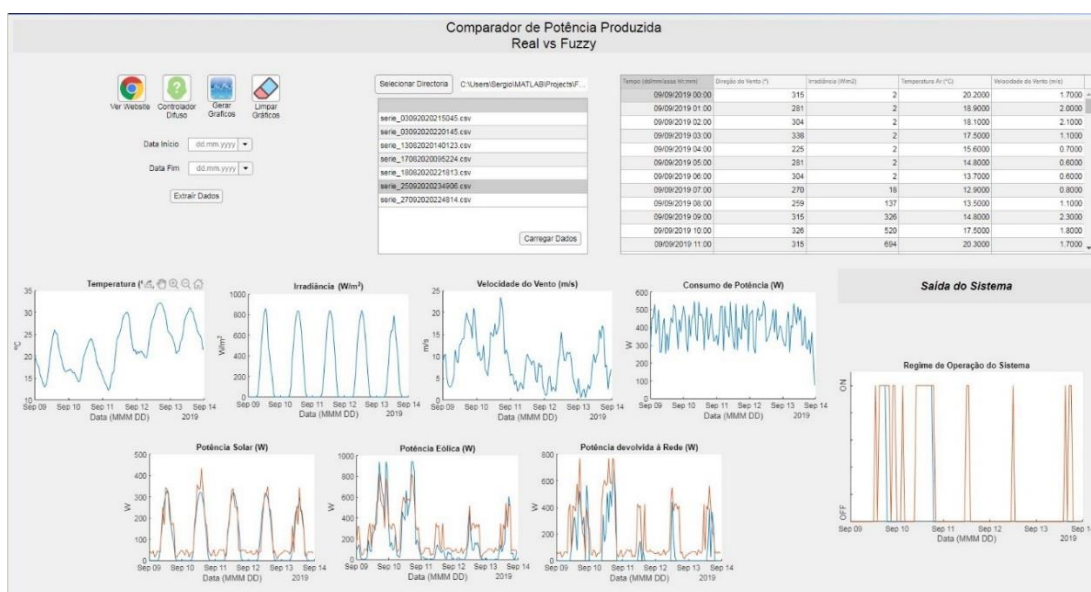


Figura 75 – Aspetto da aplicação FREC.

A aplicação está preparada para extrair os dados relativos à data e hora de aquisição dos dados, direção do vento, irradiância, temperatura do ar e velocidade do vento, para um intervalo de cinco dias, escolhido pelo utilizador. Os dados consultados correspondem à localização de Abrantes.

A Figura 76 representa o método de formulação do sistema, desde a aquisição dos dados climatéricos à apresentação dos resultados, passando pelo controlador *fuzzy* e cálculo das condições para a devolução da potência excedente à rede.

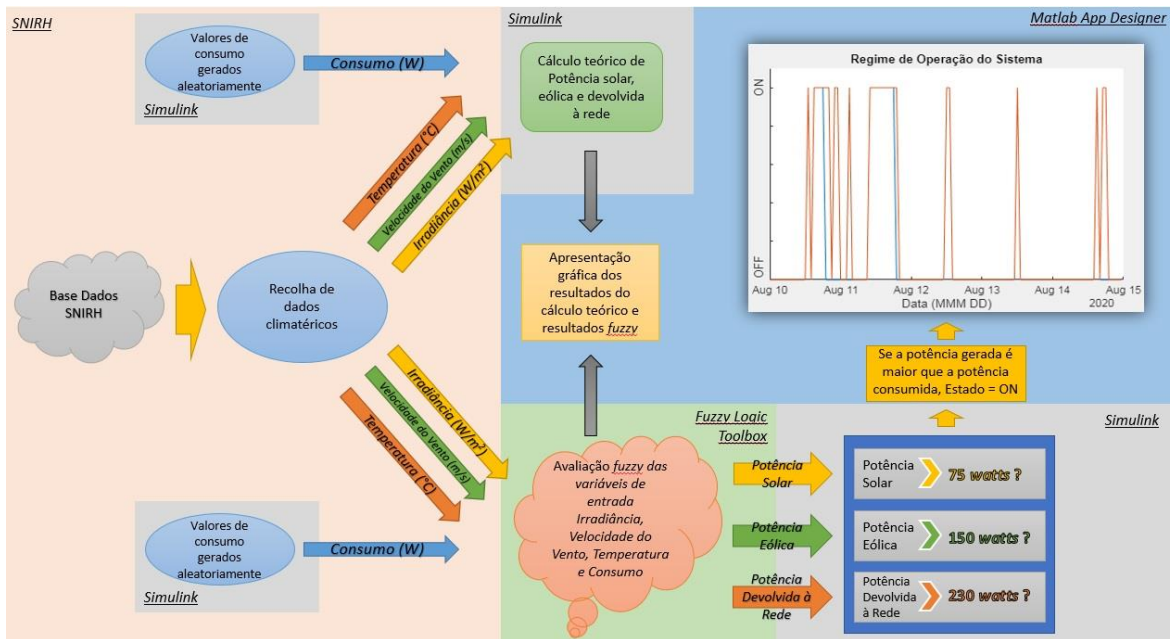


Figura 76 – Diagrama do funcionamento do projeto.

Para um esclarecimento do funcionamento da aplicação, é apresentado na Figura 77 um fluxograma com os passos a executar, de forma a obter os resultados provenientes do controlador *fuzzy*. O funcionamento da aplicação foca-se na aquisição de dados provenientes do SNIRH e na produção dos resultados provenientes do controlador *fuzzy*, mas também permite consultar o *website* do SNIRH, verificar o controlador difuso no *software* Simulink, e limpar os resultados do controlador no caso de ser necessário fazer nova avaliação.

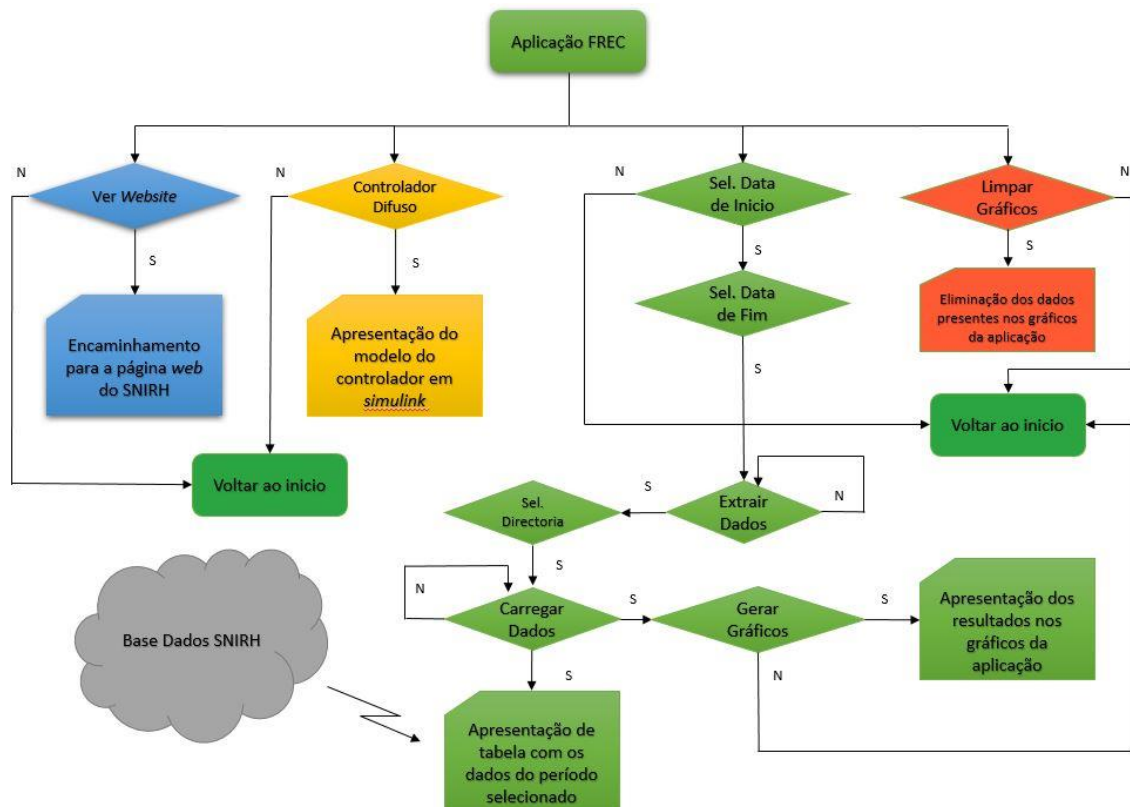


Figura 77 – Fluxograma do funcionamento da aplicação.

Na Figura 78 são apresentados dois campos para a escolha do intervalo de dados, que deverá corresponder a um intervalo de cinco dias. Seleccionadas as datas, o utilizador deverá escolher a opção “Extrair Dados” para iniciar o *download* do ficheiro CSV que contém os dados para o intervalo escolhido.



Figura 78 – Botões com as opções de encaminhamento para website SNIRH, verificação do modelo Simulink e geração de resultados *fuzzy*.

Depois de extraídos os dados, o utilizador deverá procurar pelo caminho onde o ficheiro extraído se encontra armazenado. Para esta aplicação, foi escolhida a pasta do projeto MATLAB desenvolvido. Neste passo, a aplicação permite que sejam apresentados apenas ficheiros *CSV*, de forma a facilitar a busca por parte do utilizador. A Figura 79 apresenta a seleção de um ficheiro, o “*serie_17082020095224.csv*”.

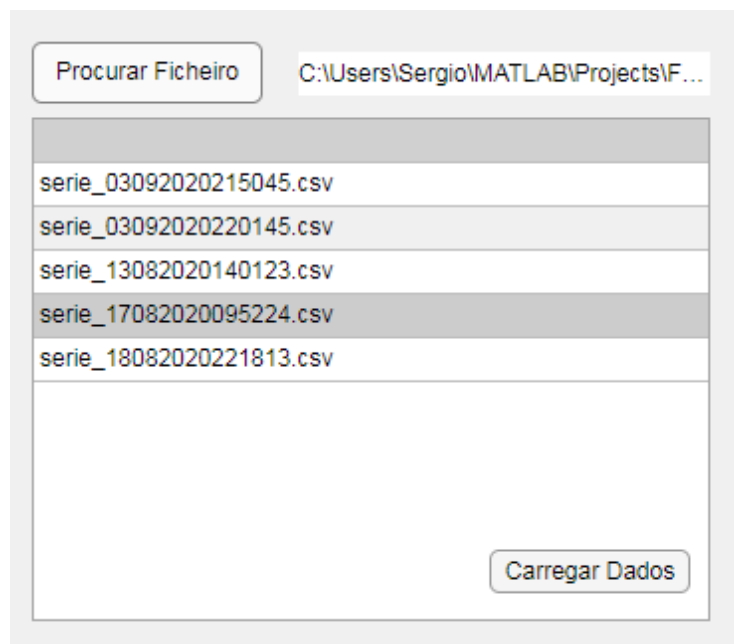


Figura 79 – Campo de seleção do ficheiro extraído.

Após selecionado o ficheiro, o utilizador deverá pressionar o botão “Carregar Dados” para que os dados sejam carregados numa tabela, conforme Figura 80. Na tabela da aplicação, é possível consultar os dados extraídos, através da barra de navegação que se encontra no lado direito da tabela, permitindo ao utilizador consultar os dados de um determinado período de aquisição, enquanto analisa os gráficos da resposta do controlador.

Tempo (dd/mm/aaaa hh:mm)	Direção do Vento (°)	Irradiância (W/m2)	Temperatura Ar (°C)	Velocidade do Vento (m/s)
10/08/2020 00:00	326	2	18.1000	2.6000
10/08/2020 01:00	326	2	17.6000	2.9000
10/08/2020 02:00	349	2	17.3000	3.4000
10/08/2020 03:00	326	2	17.3000	2.6000
10/08/2020 04:00	304	2	17.3000	2.9000
10/08/2020 05:00	338	2	17.7000	2.2000
10/08/2020 06:00	304	3	17.8000	2.0000
10/08/2020 07:00	326	24	17.9000	1.8000
10/08/2020 08:00	315	90	18.1000	1.8000
10/08/2020 09:00	315	103	18.5000	1.8000
10/08/2020 10:00	293	166	19.1000	1.5000
10/08/2020 11:00	281	393	20.6000	1.8000

Figura 80 – Tabela com os dados do ficheiro “serie_17082020095224.csv”.

Assim que a informação estiver carregada na tabela, o utilizador deverá carregar no botão “Gerar Gráficos” para que seja iniciada a simulação, e assim, obter a resposta do controlador.

Quando terminada a simulação, são apresentados graficamente os dados correspondentes às variáveis de entrada, os resultados das variáveis de saída e a saída para o sistema a controlar. Na Figura 81 é apresentado um exemplo da representação gráfica dos dados de entrada adquiridos entre os dias 10 de agosto de 2020 e 15 de agosto de 2020, Temperatura, Irradiância e Velocidade do Vento, bem como um gráfico do Consumo de Potência, que é gerado aleatoriamente pela aplicação, dentro de um intervalo de valores pré definido, visando representar um hipotético consumo de potência de uma habitação.

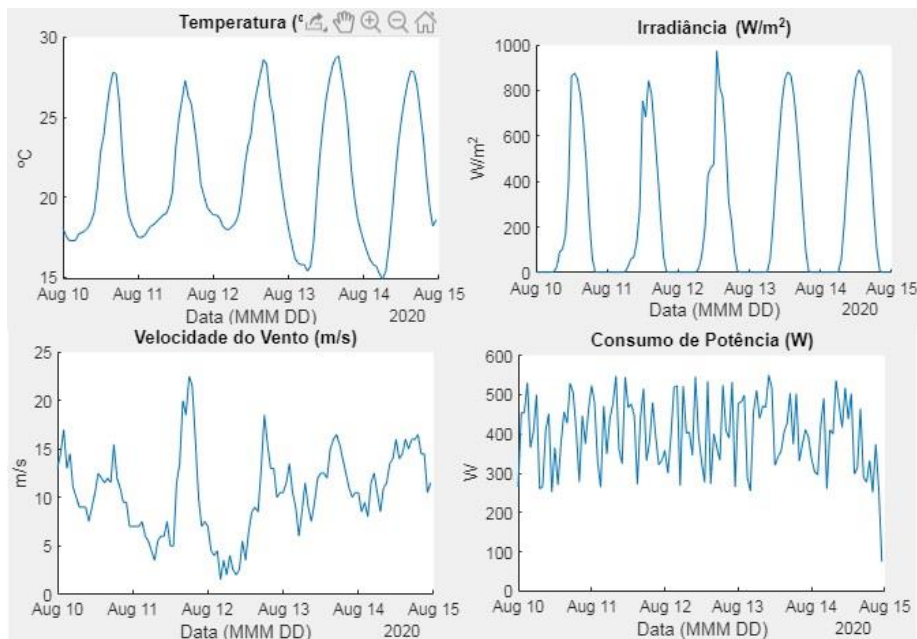


Figura 81 – Representação gráfica dos dados correspondentes às variáveis de entrada do controlador *fuzzy*.

O utilizador, colocando o cursor do rato sobre as linhas dos gráficos das diferentes variáveis de entrada ou saída, pode consultar os valores tomados pelas variáveis ao longo da semana, Figura 82. Para as variáveis de entrada, o utilizador pode ainda consultar os dados disponibilizados pela tabela apresentada na aplicação, Figura 80.

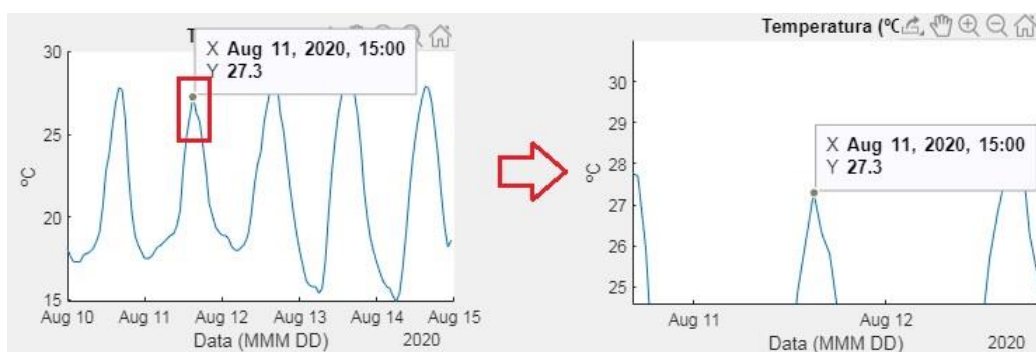


Figura 82 – Ampliação da zona assinalada no gráfico da variável de entrada TEMPERATURA, para verificação do valor de temperatura no dia 11 de agosto de 2020 às 15:00.

Na Figura 83 estão representados os valores de saída do controlador *fuzzy* para o mesmo intervalo diário, onde as linhas a azul correspondem aos valores calculados, e as linhas a castanho correspondem aos valores de saída do controlador *fuzzy*.

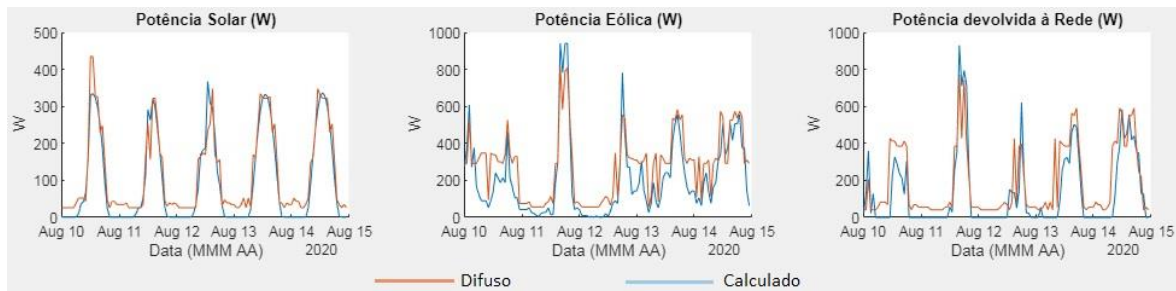


Figura 83 – Representação gráfica dos valores de saída do controlador fuzzy.

A potência devolvida à rede resulta da análise da produção de energia proveniente das duas fontes de energia renováveis e também do consumo da habitação. Analisando estas variáveis, é possível determinar a energia que não será consumida, podendo o seu excedente ser devolvido à rede elétrica de energia, a qual trará benefícios económicos ao proprietário do sistema.

4.4.4 ESCOLHA DE EQUIPAMENTOS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

Para a produção dos resultados apresentados pela aplicação, foram escolhidos dois equipamentos de produção de energia: um aerogerador eólico da marca TESUP, modelo Master940 de 940 *watts*, e um painel fotovoltaico de 435 *watts* da marca SunPower, modelo E20-435-COM.

4.4.4.1 AEROGERADOR TESUP MASTER 940

O aerogerador escolhido é classificado como um equipamento de autoconsumo para sistemas de pequena dimensão. A escolha deste equipamento baseia-se na potência disponível, o preço e a qualidade de construção do produto, comparativamente a outros disponíveis no mercado. O aerogerador tem o aspeto apresentado na Figura 84.

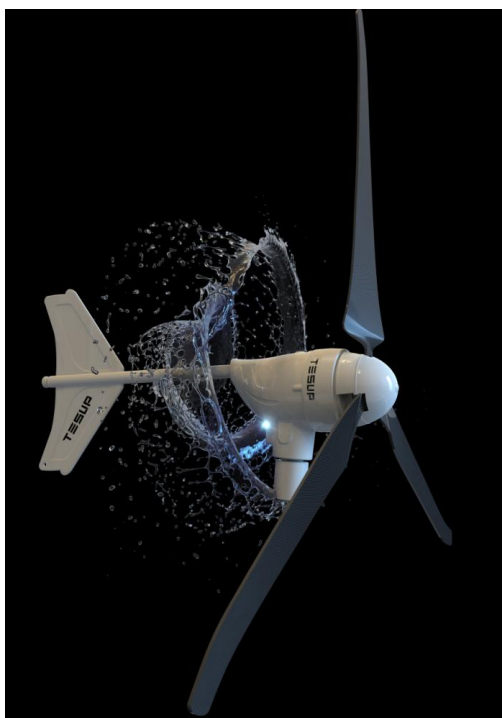


Figura 84 – Aerogerador da marca TESUP, modelo Master940 [37].

As características técnicas e a composição das pás do equipamento podem ser consultadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características técnicas do aerogerador TESUP Master940 [37].

Aerogerador	Características para aerogerador de 24 V
Tipo	Rotor de ímanes permanentes, sem escovas, <i>direct drive</i> , livre de manutenção
Peso [kg]	9
Potência máxima [Watts]	940 (15 m/s)
Tensão em circuito aberto [VAC]	0-330
Número de fases	3
Vel. Vento para Início de geração [m/s]	3
Material que constitui o equipamento	Alumínio
Direção de rotação	Frente direita

Como complemento à informação relativa ao gerador, o fabricante disponibiliza as características técnicas das pás do rotor, apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Características técnicas das pás do aerogerador TESUP Master940 [37].

Pás do Rotor	Características
Material do sistema de fixação	Alumínio
Diâmetro [metros]	1,6
Direção de rotação	No sentido dos ponteiros do relógio, olhando de frente
Velocidade máxima [rpm]	300 - 1500
Velocidade máxima [m/s]	27
Emissões de ruído [db(A)]	35

Segundo a informação técnica disponibilizada pelo fabricante, foram elaborados os cálculos para a obtenção dos resultados do aerogerador, para as condições climáticas existentes, recorrendo à fórmula seguinte:

$$P_a = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times C_p \quad (4.1)$$

4.4.4.2 PAINEL FOTOVOLTAICO SUNPOWER E20-435-COM

Para a obtenção dos resultados da potência solar pelo controlador *fuzzy*, foram escolhidas as características de um painel monocristalino de 435 watts da SUNPOWER, Figura 85. A escolha incidiu apenas na potência total gerada por apenas um painel. Não foram consideradas as vantagens ou desvantagens de um painel monocristalino, face a um painel policristalino.

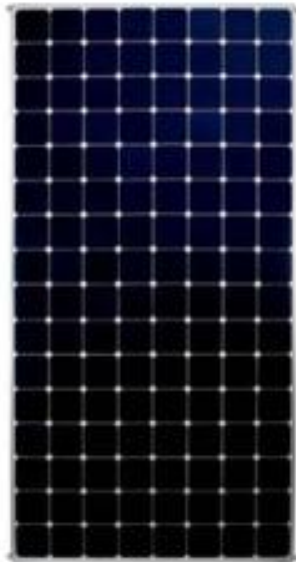


Figura 85 – Painel fotovoltaico do fabricante SunPower, modelo E20-435-COM [38].

Os resultados obtidos basearam-se nas características técnicas apresentadas no *datasheet* do equipamento, que podem ser consultadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Características técnicas do painel fotovoltaico do fabricante SunPower, modelo E20-435-COM [38].

Características Elétricas E20-435-COM	
Potência Nominal [<i>watt</i>]	435
Tolerância de Potência [%]	+5/ -3
Eficiência Média do Painel [%]	20,3
Tensão à Potência Máxima (V_{mpp}) [V]	72,9
Corrente à Potência Máxima (I_{mpp}) [A]	5,97
Tensão em Circuito Aberto (V_{oc}) [V]	85,6
Corrente de Curto Circuito (I_{SC}) [A]	6,43
Coefficiente Potência-Temperatura	-0,35%/ °C
Coefficiente Tensão-Temperatura	-235,5 mV/ °C
Coefficiente Corrente-Temperatura	2,6 mA/ °C

Segundo a informação técnica disponibilizada pelo fabricante, foram elaborados os cálculos para a obtenção dos resultados do painel fotovoltaico, para as condições climáticas existentes, recorrendo à fórmula seguinte:

$$P_{PV_o}(s) = N \times FF \times V_y \times I_y \quad (4.2)$$

4.4.4.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA DEVOLVIDA À REDE

Neste projeto considerou-se que a potência devolvida à rede resultaria da diferença entre a potência consumida, e o resultado da soma entre as potências solar e eólica produzidas. Foi utilizada a expressão seguinte para obter a potência devolvida à rede:

$$u_3 = u_1 - (u_2 + u_3) \quad (4.3)$$

onde,

u_1 – Potência Consumida (CONSUMO);

u_2 – Potência Eólica (EOLICA);

u_3 – Potência Solar (SOLAR)

5. RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das três variáveis de saída do controlador difuso: potência solar, potência eólica e potência devolvida à rede, comparativamente aos resultados calculados, e recorrendo às fórmulas de potência de saída do sistema fotovoltaico e do aerogerador mencionados anteriormente.

Foram escolhidos os dias úteis das semanas de 9 a 13 de setembro do ano 2019 e de 10 a 14 de agosto de 2020, para a recolha dos dados e posterior análise.

Para a apresentação dos resultados obtidos, foram utilizados os valores médios diários das potências solar, eólica e de devolução à rede. Foi considerado um consumo do sistema a alimentar, gerado por uma variável aleatória cujos valores se encontram no intervalo entre 250 *watts* e 550 *watts*.

De forma a avaliar o erro entre os resultados expressos pelo controlador *fuzzy* e os valores calculados teoricamente, é utilizada a expressão do erro absoluto médio (IAE – *Integral Absolute Error*):

$$IAE = \frac{\sum |Valor_{calculado} - Valor_{difuso}|}{numero\ de\ amostras} \times 100 \quad (5.0)$$

Analisando os valores da Tabela 11 e da Figura 86, é possível verificar que existe dificuldade em obter uma resposta aproximada ao valor calculado quando os valores da potência calculada são nulos, ou próximos de zero. Verifica-se ainda que a resposta difusa diverge de forma mais acentuada do valor calculado, nos valores de pico de irradiância e para valores de irradiância nulos.

Assim, considera-se para a resposta do sistema que, para valores de potência solar produzida inferiores a 75 *watts*, o sistema de produção solar deverá se encontrar desligado, pois não será capaz de produzir energia suficiente para alimentar o próprio painel solar e ainda fornecer energia para o consumo da habitação. Com a consideração anterior, consegue-se um IAE semanal de 9,258 %.

Tabela 11 – Potências solar, calculada e difusa, face aos valores de temperatura e irradiância, na semana de 9 a 13 de setembro de 2019.

Dia	Entradas		Saídas		IAE (%)
	Temperatura Média (°C)	Irradiância Média (W/m ²)	Potência Solar Calculada Média (W)	Potência Solar Difusa Média (W)	
9 Set	20,44	509,50	211,167	231,855	9,797
10 Set	21,46	603,70	243,226	295,800	21,615
11Set	26,32	624,44	239,946	227,167	5,326
12 Set	29,37	624,56	238,329	234,417	1,641
13 Set	29,34	566,50	217,287	200,100	7,910

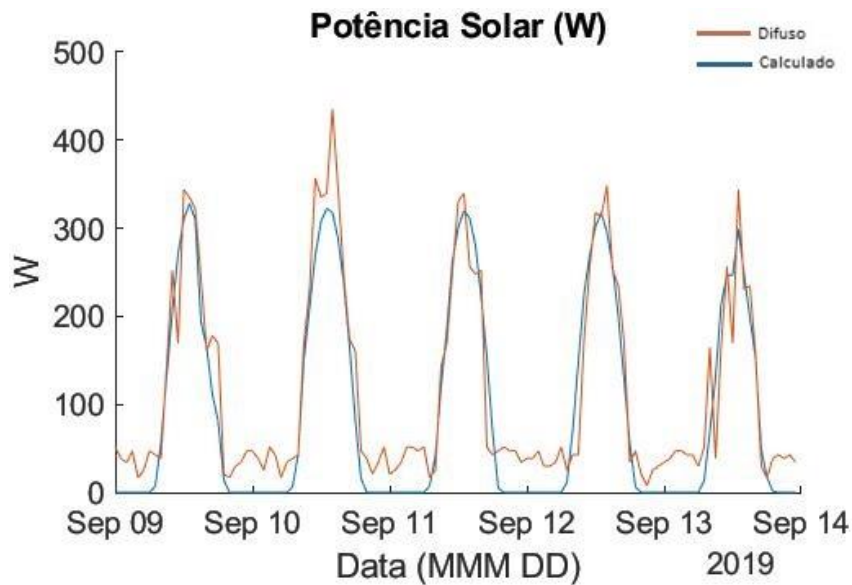


Figura 86 – Representação gráfica dos resultados obtidos, através da produção de energia com recurso ao painel solar, entre os dias 9 e 13 de setembro de 2019.

A avaliação difusa da potência eólica produzida, Figura 87, apresenta uma melhor aproximação ao valor calculado, para valores mais baixos, compreendidos entre 0 *watts* a 100 *watts*. De forma a ser possível verificar a resposta do controlador para diferentes valores de velocidade de vento, quer para valores baixos, quer para valores próximos do máximo admissível pelo aerogerador, os valores extraídos da aplicação *web*, referentes à velocidade do vento, foram multiplicados por 5. A título de exemplo, o valor extraído da base de dados, para o dia 9 de setembro de 2019, é de 2 *m/s*. No entanto, foi considerado o valor de 10 *m/s*, resultante da multiplicação da referida Tabela 12.

Tabela 12 – Potências eólica, calculada e difusa, face aos valores de temperatura e velocidade do vento, na semana de 9 a 13 de setembro de 2019.

Dia	Entradas		Saídas		
	Temperatura Média (°C)	Velocidade do Vento Média (m/s)	Potência Eólica Calculada Média (W)	Potência Eólica Difusa Média (W)	IAE (%)
9 Set	20,662	16,115	551,010	493,138	10,503
10 Set	20,421	15,964	505,380	523,043	3,498
11Set	-	-	-	-	-
12 Set	30,160	12,100	233,578	349,680	49,706
13 Set	29,380	14,800	424,872	438,040	3,099

Neste caso, considera-se para a resposta do sistema que, para valores de potência eólica produzida inferiores a 150 watts, o sistema de produção eólica se deve manter desligado, pois não irá produzir energia que compense o seu próprio consumo para se manter a trabalhar. Com a consideração anterior, consegue-se um IAE de 16,701 %. Para o dia 11 de setembro, a potência gerada não excedeu os 150 watts, e por isso, considera-se que o aerogerador esteve desligado.

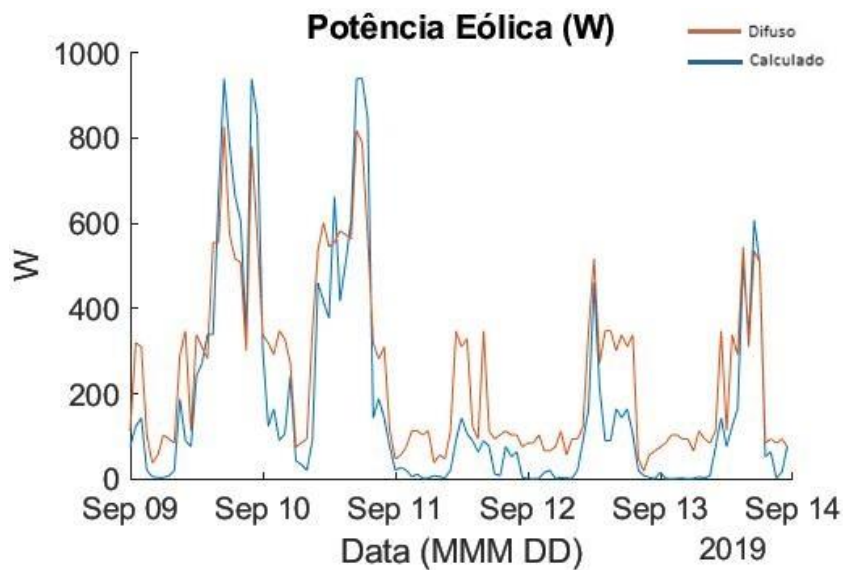


Figura 87 – Representação gráfica dos resultados obtidos, através da produção de energia com recurso ao aerogerador, entre os dias 9 e 13 de setembro de 2019.

A resposta do controlador difuso para a potência devolvida à rede, apresenta valores aproximados aos calculados teoricamente para os valores de pico (entre 600 e 800 *watts*). Essa aproximação também se verifica quando o resultado calculado é nulo, havendo diferenças compreendidas entre aproximadamente os 40 e os 55 *watts*.

Tabela 13 – Potência devolvida à rede, calculada e difusa, na semana de 9 a 13 de setembro de 2019.

Dia	Potência devolvida à Rede Calculada Média (W)	Potência devolvida à rede Difusa Média (W)	IAE (%)
9 Set	491,319	401,250	18,332
10 Set	589,306	596,750	1,263
11Set	-	-	-
12 Set	396,762	467,500	17,829
13 Set	344,487	343,750	0,214

Através da Figura 88 e da Tabela 13 é possível verificar a resposta obtida pela análise do controlador difuso para os diferentes parâmetros de entrada. Considerou-se que para valores abaixo de 235 *watts* – resultantes da soma de 75 *watts* de potência solar com 150 *watts* de potência eólica – os sistemas solar e eólico estão desligados, apresentando a resposta do controlador um IAE de 9,409 %. Para o dia 11 de setembro, a potência gerada não excedeu os 235 *watts*, e por isso, considera-se que os sistemas de produção de energia não devolveram energia à rede.

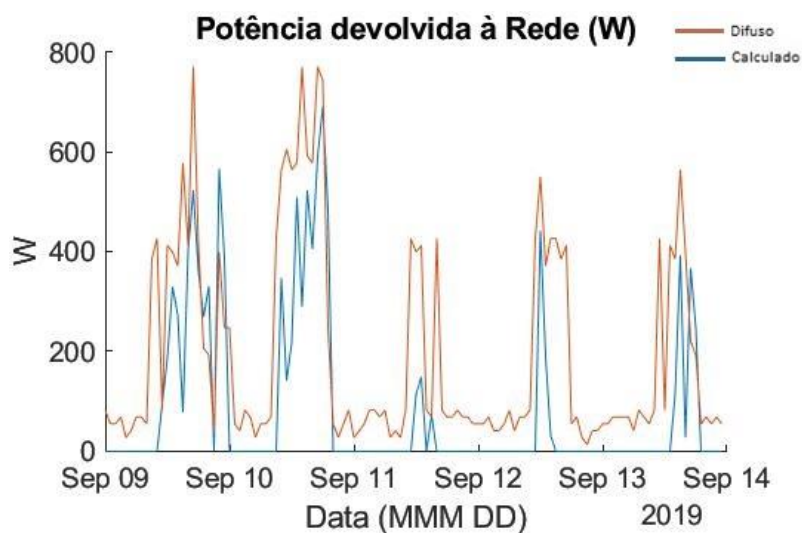


Figura 88 – Representação gráfica dos resultados obtidos, da potência devolvida à rede, entre os dias 9 e 13 de setembro de 2019.

O perfil da resposta e os valores para os intervalos escolhidos, são apresentados na Tabela 14 e na Figura 89, respetivamente.

Tabela 14 – Potências solar, calculada e difusa, face aos valores de temperatura e irradiância, na semana de 10 a 14 de agosto de 2020.

Dia	Entradas		Saídas		IAE (%)
	Temperatura Média (°C)	Irradiância Média (W/m ²)	Potência Solar Calculada Média (W)	Potência Solar Difusa Média (W)	
10 Ago	25,125	642,125	246,930	293,625	18,910
11 Ago	24,788	584,750	225,838	227,288	0,642
12 Ago	25,250	523,600	202,245	195,315	3,426
13 Ago	25,245	613,364	235,709	249,532	5,864
14 Ago	24,255	618,091	238,058	258,627	8,640

Assim, considera-se para a resposta do sistema que, para valores de potência solar produzida inferiores a 75 *watts*, o sistema de produção solar se encontra desligado, pelo mesmo motivo já referido anteriormente. Com a consideração anterior, consegue-se um IAE de 7,497 %.

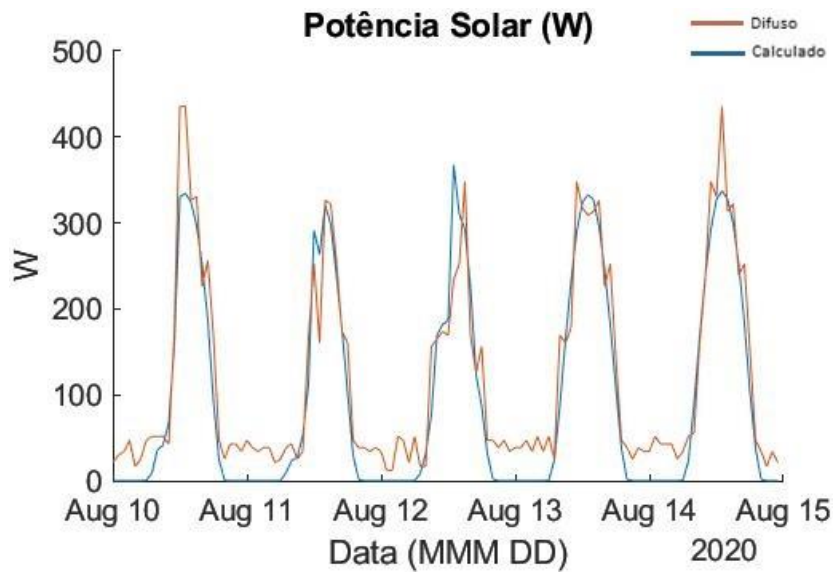


Figura 89 – Representação gráfica dos resultados obtidos, através da produção de energia com recurso ao painel solar, entre os dias 10 e 14 de agosto de 2020.

A avaliação difusa da potência eólica para a semana de 10 a 14 de agosto de 2020 é apresentada na Tabela 15 e na Figura 90.

Tabela 15 – Potências eólica, calculada e difusa, face aos valores de temperatura e velocidade do vento, na semana de 10 a 14 de agosto de 2020.

Dia	Entradas		Saídas		IAE (%)
	Temperatura Média (°C)	Velocidade do Vento Média (m/s)	Potência Eólica Calculada Média (W)	Potência Eólica Difusa Média (W)	
10 Ago	21,843	12,929	282,362	361,229	27,931
11 Ago	24,786	17,643	657,386	592,200	9,916
12 Ago	25,080	14,600	411,678	359,080	12,777
13 Ago	23,750	13,286	305,419	390,100	27,726
14 Ago	22,625	14,188	368,419	447,088	21,353

Neste caso, considera-se para a resposta do sistema que, para valores de potência eólica produzida inferiores a 130 *watts*, o sistema de produção eólica se encontra desligado. Com a consideração anterior, consegue-se um IAE na ordem dos 19,941 %.

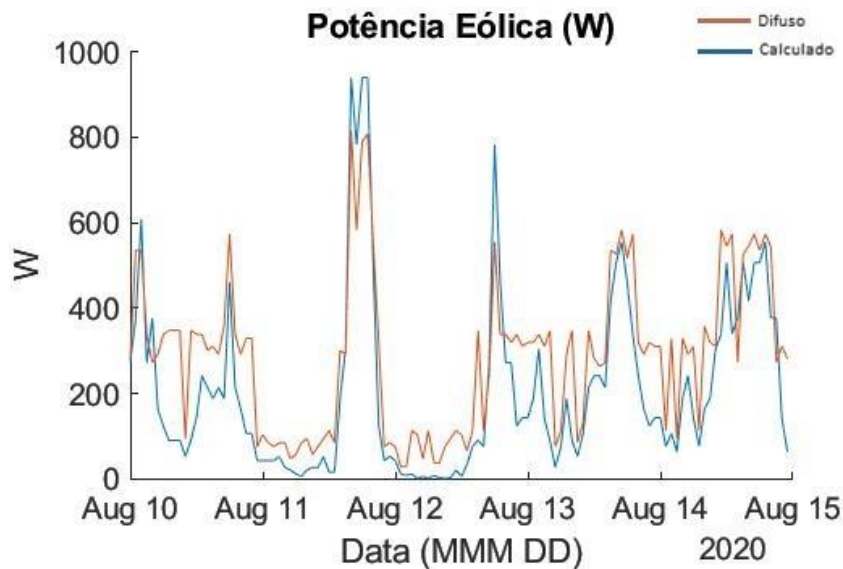


Figura 90 – Representação gráfica dos resultados obtidos, através da produção de energia com recurso ao aerogerador, entre os dias 10 e 14 de agosto de 2020.

A resposta do controlador difuso para a potência devolvida à rede, para o intervalo entre 10 e 14 de agosto de 2020, tal como na semana de 9 a 13 de setembro de 2019, apresenta valores aproximados aos calculados nos valores de pico (entre 600 e 800 *watts*). Essa aproximação também se verifica quando o resultado calculado é nulo, havendo diferenças compreendidas entre aproximadamente os 40 e os 55 *watts*. Através da Tabela 16 e da Figura 91 é possível verificar a resposta obtida pela análise do controlador difuso para os diferentes parâmetros de entrada.

Tabela 16 – Potência devolvida à rede, calculada e difusa, na semana de 10 a 14 de agosto 2020.

Dia	Potência devolvida à Rede Calculada Média (W)	Potência devolvida à rede Difusa Média (W)	IAE (%)
10 Ago	319,239	357,500	11,985
11 Ago	574,955	479,286	16,639
12 Ago	432,160	323,125	25,230
13 Ago	369,660	450,313	21,818
14 Ago	425,870	501,875	17,847

Considerando que os valores abaixo de 235 *watts*, os sistemas solar e eólico estão desligados, a resposta do controlador apresenta um IAE de 18,704 %.

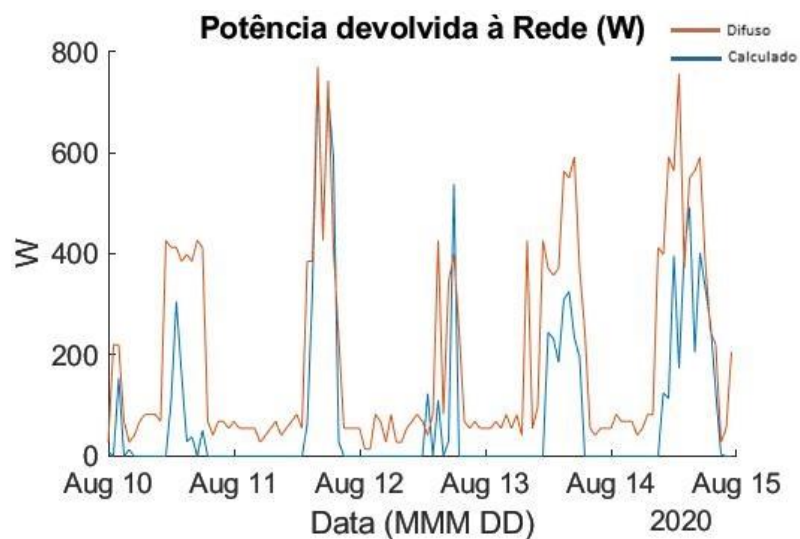


Figura 91 – Representação gráfica dos resultados obtidos, da potência devolvida à rede, entre os dias 10 e 14 de agosto de 2020.

Tabela 17 – Resultados das potências médias calculadas e difusas na semana de 9 a 13 de setembro de 2019.

Dia	Potência Calculada Média (W)			Potência Difusa Média (W)		
	Solar	Eólica	Rede	Solar	Eólica	Rede
9 Set	211,167	551,010	491,319	231,855	493,138	401,250
10 Set	243,226	505,380	589,306	295,800	523,043	596,750
11Set	239,946	-	-	227,167	-	-
12 Set	238,329	233,578	396,762	349,680	349,680	467,500
13 Set	217,287	424,872	344,487	200,100	438,040	343,750

No dia 11, Tabela 17, é possível verificar que não existem valores definidos para as potências eólica e devolvida à rede. Tal acontece, porque não se reuniram as condições favoráveis, nomeadamente, a produção de energia eólica acima de 150 *watts*, por não se registar velocidade do vento suficiente, e devolução da potência à rede superior a 230 *watts*, porque ao longo do dia, a soma das potências eólica e solar não excedeu a potência consumida.

Relativamente à semana entre 10 e 14 de agosto de 2020, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados de potências calculada e difusa na semana de 10 a 14 de agosto de 2020.

Dia	Potência Calculada Média (W)			Potência Difusa Média (W)		
	Solar	Eólica	Rede	Solar	Eólica	Rede
10 Ago	246,930	282,362	319,239	293,625	361,229	357,500
11 Ago	225,838	657,386	574,955	227,288	592,200	479,286
12 Ago	202,245	411,678	432,160	195,315	359,080	323,125
13 Ago	235,709	305,419	369,660	249,532	390,100	450,313
14 Ago	238,058	368,419	425,870	258,627	447,088	501,875

Os resultados para a semana de agosto de 2020 escolhida, são semelhantes aos resultados da semana de setembro de 2019. No entanto, verifica-se uma diferença mais acentuada da potência solar indicada pelo controlador difuso, no primeiro e no último dia da semana analisados, correspondente aos dias 10 e 14 de agosto, respectivamente.

5.1 RESPOSTA DO SISTEMA

Avaliando o desempenho do controlador difuso, definiu-se então um conjunto de regras de operação dos sistemas fotovoltaico e eólico, sendo que para o sistema fotovoltaico as regras são:

- *Se $u_1 < u_2$ e $u_3 \geq 75$ ou $u_1 > u_2$ e $u_3 > u_1$, Sistema fotovoltaico a operar.*
- *Se $u_3 < 75$, Sistema fotovoltaico desligado.*

onde,

u_1 – Potência Consumida (CONSUMO);

u_2 – Potência Eólica (EOLICA);

u_3 – Potência Solar (SOLAR).

E para o sistema eólico:

- *Se $u_4 < u_5$ e $u_6 \geq 130$ ou $u_4 > u_5$ e $u_6 > u_4$, Sistema eólico a operar.*
- *Se $u_6 < 130$, Sistema eólico desligado.*

onde,

u_4 – Potência Consumida (CONSUMO);

u_5 – Potência Solar (SOLAR);

u_6 – Potência Eólica (EOLICA);

A resposta do sistema para as diferentes semanas pode ser observada na Figura 92 e Figura 93, e nas tabelas apresentadas no Anexo A.

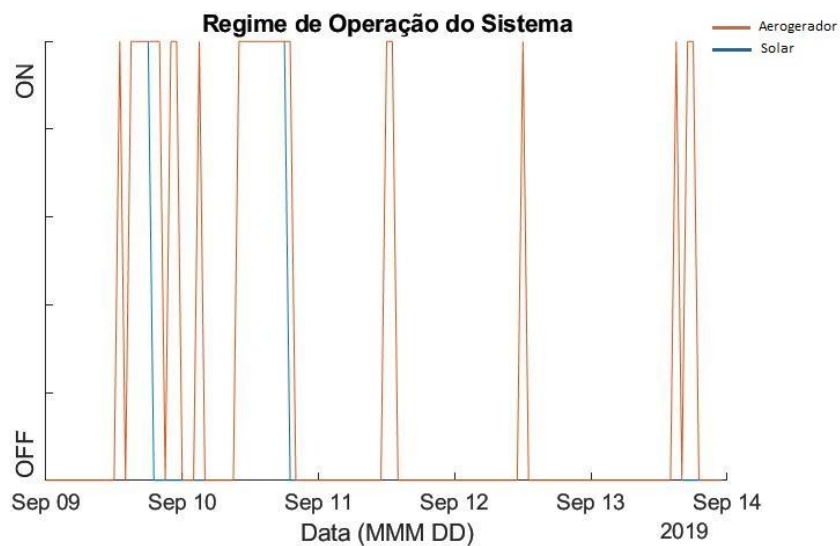


Figura 92 – Regime de operação do sistema, relativamente à operação dos sistemas fotovoltaico e eólico, para a semana de 9 a 13 de setembro de 2019.

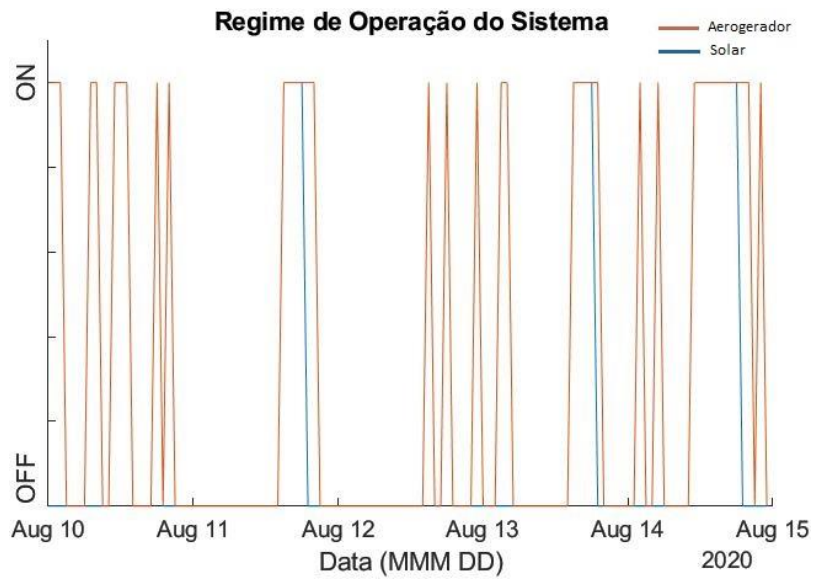


Figura 93 – Regime de operação do sistema, relativamente a operação dos sistemas fotovoltaico e eólico, para a semana de 10 a 14 de agosto de 2020.

O utilizador, pode utilizar a função de ampliação do gráfico, para verificar com maior detalhe, os sistemas que estão ligados num determinado período, Figura 94.

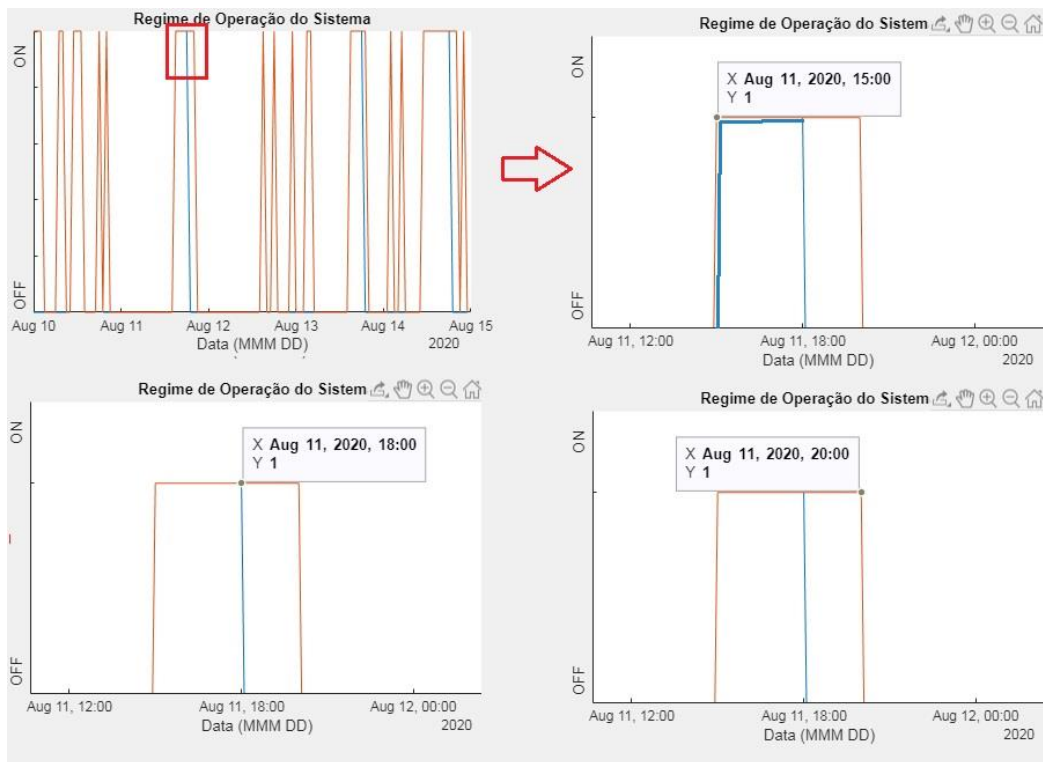


Figura 94 – Ampliação do gráfico dos resultados, para verificação dos sistemas que estão ligados/ desligados, num determinado período.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste projeto permitiu que fosse adquirido conhecimento sobre lógica difusa e sobre o desenvolvimento de aplicações em ambiente MATLAB, e a sua integração com as bibliotecas *Fuzzy Logic* e *Simulink*.

A necessidade constante de melhoria da eficiência na produção de energias renováveis, leva à procura de diferentes estratégias para melhorar a previsão da saída dos sistemas fotovoltaicos e eólicos. Por outro lado, a diminuição de emissões dos gases prejudiciais ao ambiente, serve de motivação à melhoria das tecnologias de conversão solar e eólica em energia elétrica.

A aplicação desenvolvida permite ao utilizador extrair a informação climatérica de um determinado local (Abrantes), e consultar numa tabela a informação. Além disso, o utilizador tem acesso ao *website* onde consta a informação extraída, e pode consultar o modelo do controlador difuso e fazer os ajustes que achar necessários.

O sistema apresentou uma boa resposta para a energia solar, mas apresentou uma resposta menos positiva para a previsão da potência eólica e da potência devolvida à rede.

Deste projeto conclui-se que a resposta do controlador difuso apresenta um maior erro face aos valores calculados, quando as potências calculadas são nulas, ou próximas de zero. E ainda, que o número de regras e o método de colapsagem têm um peso significativo na definição da resposta do controlador. No entanto, verificou-se na aplicação MATLAB que, quanto maior o número de regras, maior a dificuldade em ajustar o controlador.

6.1 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Relativamente a desenvolvimentos futuros, nomeadamente às capacidades da aplicação gráfica, seria interessante tornar a aplicação dinâmica no número de dias a consultar, bem como a possibilidade de seleção da localização, para consulta dos dados climáticos. E ainda, em vez da possibilidade de alteração dos parâmetros dos sistemas de conversão solar e eólico diretamente no Simulink, poderiam ser criados objetos de interface na aplicação, que permitissem alterar esses parâmetros para, por exemplo, a aplicação servir para comparação de alguns desses sistemas.

Para diminuir o erro dos resultados difusos face aos calculados, sugere-se o aumento do número de conjuntos difusos das variáveis de entrada e, conseqüentemente, o aumento do número de regras de avaliação difusa.

Referências Documentais

- [1] S.M. Mousavi, S.H. Fathi — Energy Management of Wind/PV and Battery Hybrid System with Consideration of Memory Effect in Battery, IEEE, 2009.
- [2] F.O. Resende — Evolução tecnológica dos sistemas de conversão de energia eólica para ligação à rede, Universidade Lusófona do Porto, <http://recil.grupolusofona.pt/handle/10437/2861>, 2011, acedido em 16/10/2020.
- [3] Stefan Ivarsson — 2030 & 2050 ENERGY SCENARIOS BALTIC SEA REGION, RISE Research Institutes of Sweden, Maritime Research, <https://energiforsk.se/media/27100/stefanivarsson-future-energy-scenarios-for-the-baltic.pdf>, 2019, acedido em 16/10/2020.
- [4] T. Ackermann — Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 0-470-85508-8 (HB), <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0470012684>, 2005, acedido em 16/10/2020.
- [5] <https://renewablesnow.com/news/ges-12-mw-turbine-generates-1st-power-in-rotterdam-675729/>, acedido em 19/11/2019.
- [6] Autor desconhecido — A Little history of solar cells, acedido em 16/10/2020.
- [7] https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_01/chapter_01/, acedido em 6/4/2020.
- [8] <https://www.apren.pt/contents/documents/apren-relatorio-impactos-eletricidade-fer.pdf>, acedido em 6/4/2020.
- [9] U. Zafar — Literature Review of Wind Turbines, <https://www.researchgate.net/publication/329680977>, 2018, acedido em 16/10/2020.
- [10] Figura adaptada de <https://sipse.com/novedades-yucatan/yucatan-producira-energia-electrica-parques-eolicos-fotovoltaicos-yucatan-208458.html>, acedido em 6/4/2020.
- [11] C. Shen — Various Wind Turbine Technologies, Research Associate, Global Energy Network Institute (GENI), 2012.
- [12] P.R. Wolfe — The Solar Generation: Childhood and Adolescence of Terrestrial Photovoltaics, First Edition, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc, 2018.
- [13] BlueSol energia solar, <https://blog.bluesol.com.br/efeito-fotoeletrico-fotovoltaico/>, acedido em 7/4/2020.
- [14] <https://www.pinterest.co.kr/pin/153615037275910733/>, acedido em 7/4/2020.
- [15] <http://www.armasul.com/o-que-fazer-com-os-paineis-solares-usados/>, acedido em 7/4/2020.

- [16] <https://www.portal-energia.com/em-que-consiste-sistema-seguidor-solar-fotovoltaico/>, acessado em 7/4/2020.
- [17] Hala J. El-Khozondar, Rifa J. El-Khozondar, Khaled Matter 1 and Teuvo Suntio, A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms, *Renewables: Wind, Water, and Solar a SpringerOpen Journal*, 2016.
- [18] A-Mohammed, S.S. Reffat, S. Bayhan, H. Abu-Rub — AC Microgrid Control and Management Strategies, *IEEE Power Electronics Magazine*, 2019.
- [19] Kyaw Myo Lin, SOLAR IRRADIANCE AND POWER OUTPUT MODELING OF PHOTO-VOLTAIC MODULE FOR RELIABILITY STUDIES: CASE STUDY OF MANDALAY REGION, <https://www.researchgate.net/publication/326654678>, 2018, acessado em 16/10/2020.
- [20] L.A. ZADEH—*Advances in Fuzzy Systems - Applications and Theory, Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Systems*, Vol. 6.0, May 1996.
- [21] L.A. ZADEH — *Fuzzy Logic, IEEE*, 1988.
- [22] A. Sostaks — *Mathematics in the context of fuzzy sets: basic ideas, concepts, and some remarks on the history and recent trends of development*, Taylor&Francis, 2010.
- [23] J. Yen — *Fuzzy Logic – A Modern Perspective*, *IEEE Transactions of knowledge and data engineering*, 1999.
- [24] A. KONAR, *Computational Intelligence: Principles: Techniques and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, ISBN 3-540-20898-4.
- [25] M. Hudec — *Fuziness in Information Systems: How to Deal with Crisp and Fuzzy Data in Selection, Classification, and Summarization*, ISBN 978-3-319-42516-0, Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- [26] E.P. Klement, R. Mesiar, E. Pap — Triangular norms. Position paper I: basic analytical and algebraic properties, Science Direct http://www.flll.jku.at/sites/default/files/44_2004_KMesPap_TNormsPosPaperI_FSSPrintedVersion.pdf, 2004, acessado em 16/10/2020.
- [27] L.A. ZADEH — *The Concept of Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning*, American Elsevier Publishing Company, Inc, 1975.
- [28] L.A. ZADEH — *Soft Computing and Fuzzy Logic*, IEEE, 1994.
- [29] D.Z. Saletic, D.M. Velašević, N.E.Mastorakis — Analysis of basic defuzzification techniques. In: Mastorakis, N.E., Mladenov, V. (eds.) *Recent Advances in Computers, Computing and*, In: Mastorakis, N.E., Mladenov, V. (eds.) *Recent Advances in Computers, Computing and Communications*, pp. 247–252. WSEAS Press, 2002.
- [30] D. Samanta — *Indian Institute of Technology Kharagpur*.
- [31] R. Babuska — *Fuzzy Systems, Modeling and Identification*, Research Gate, <https://www.researchgate.net/publication/228769192>, 2014.

- [32] Jan Jantzen — Design Of Fuzzy Controllers <https://www.researchgate.net/publication/228751652>, 1998, acedido em 16/10/2020.
- [33] I.IANCU — A Mamdani Type Fuzzy Logic Controller, University of Craiova, Romania
- [34] H.J. Zimmerman — Fuzzy Set Theory and Its Applications, Fourth Edition, *Springer Science+Business Media, LLC*, ISBN 978-94-010-3870-6, 2001.
- [35] https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, acedido em 8/4/2020.
- [36] Mathworks, Fuzzy Logic Toolbox: User's Guide, MATLAB R2020a, 2020.
- [37] Manual de Utilizador do aerogerador TESUP Master940, 2019.
- [38] Datasheet SunPower E20-435-COM, 2017.

Anexo A. Subsistemas dos modelos de cálculo das potências de saída solar e eólica

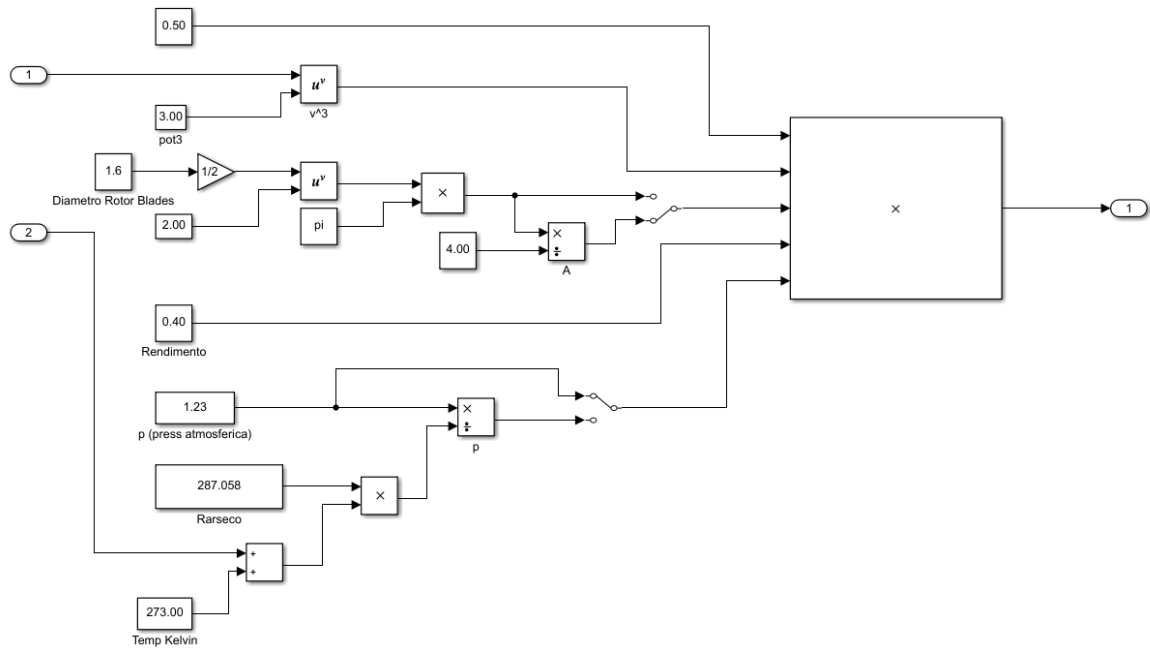


Figura 95 – Subsistema para cálculo da potência de saída do aerogerador TESUP Master940, em Simulink.

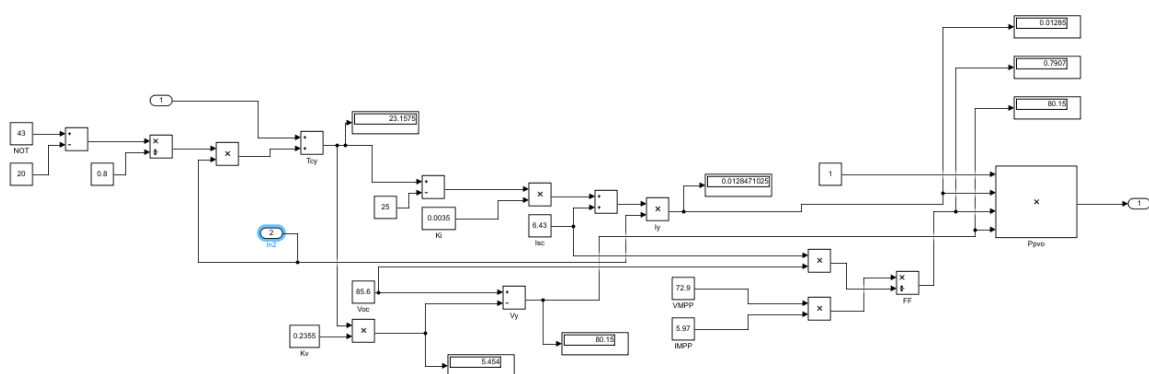


Figura 96 – Subsistema para cálculo da potência de saída do aerogerador SunPower E20-435-COM, em Simulink.

Anexo B. Tabelas da resposta do sistema para as semanas 9 a 13 de setembro de 2019 e 10 a 14 de agosto de 2020

Data	PVEstado	EOEstado
9-9-19 0:00	Desligado	Desligado
9-9-19 1:00	Desligado	Desligado
9-9-19 2:00	Desligado	Desligado
9-9-19 3:00	Desligado	Desligado
9-9-19 4:00	Desligado	Desligado
9-9-19 5:00	Desligado	Desligado
9-9-19 6:00	Desligado	Desligado
9-9-19 7:00	Desligado	Desligado
9-9-19 8:00	Desligado	Desligado
9-9-19 9:00	Desligado	Desligado
9-9-19 10:00	Desligado	Desligado
9-9-19 11:00	Desligado	Desligado
9-9-19 12:00	Desligado	Desligado
9-9-19 13:00	Ligado	Ligado
9-9-19 14:00	Desligado	Desligado
9-9-19 15:00	Ligado	Ligado
9-9-19 16:00	Ligado	Ligado
9-9-19 17:00	Ligado	Ligado
9-9-19 18:00	Ligado	Ligado
9-9-19 19:00	Desligado	Ligado
9-9-19 20:00	Desligado	Ligado
9-9-19 21:00	Desligado	Desligado
9-9-19 22:00	Desligado	Ligado
9-9-19 23:00	Desligado	Ligado
10-9-19 0:00	Desligado	Desligado
10-9-19 1:00	Desligado	Desligado
10-9-19 2:00	Desligado	Desligado
10-9-19 3:00	Desligado	Ligado
10-9-19 4:00	Desligado	Desligado
10-9-19 5:00	Desligado	Desligado
10-9-19 6:00	Desligado	Desligado
10-9-19 7:00	Desligado	Desligado
10-9-19 8:00	Desligado	Desligado
10-9-19 9:00	Desligado	Desligado
10-9-19 10:00	Ligado	Ligado

10-9-19 11:00	Ligado	Ligado
10-9-19 12:00	Ligado	Ligado
10-9-19 13:00	Ligado	Ligado
10-9-19 14:00	Ligado	Ligado
10-9-19 15:00	Ligado	Ligado
10-9-19 16:00	Ligado	Ligado
10-9-19 17:00	Ligado	Ligado
10-9-19 18:00	Ligado	Ligado
10-9-19 19:00	Desligado	Ligado
10-9-19 20:00	Desligado	Desligado
10-9-19 21:00	Desligado	Desligado
10-9-19 22:00	Desligado	Desligado
10-9-19 23:00	Desligado	Desligado
11-9-19 0:00	Desligado	Desligado
11-9-19 1:00	Desligado	Desligado
11-9-19 2:00	Desligado	Desligado
11-9-19 3:00	Desligado	Desligado
11-9-19 4:00	Desligado	Desligado
11-9-19 5:00	Desligado	Desligado
11-9-19 6:00	Desligado	Desligado
11-9-19 7:00	Desligado	Desligado
11-9-19 8:00	Desligado	Desligado
11-9-19 9:00	Desligado	Desligado
11-9-19 10:00	Desligado	Desligado
11-9-19 11:00	Desligado	Desligado
11-9-19 12:00	Ligado	Ligado
11-9-19 13:00	Ligado	Ligado
11-9-19 14:00	Desligado	Desligado
11-9-19 15:00	Desligado	Desligado
11-9-19 16:00	Desligado	Desligado
11-9-19 17:00	Desligado	Desligado
11-9-19 18:00	Desligado	Desligado
11-9-19 19:00	Desligado	Desligado
11-9-19 20:00	Desligado	Desligado
11-9-19 21:00	Desligado	Desligado
11-9-19 22:00	Desligado	Desligado
11-9-19 23:00	Desligado	Desligado
12-9-19 0:00	Desligado	Desligado
12-9-19 1:00	Desligado	Desligado
12-9-19 2:00	Desligado	Desligado
12-9-19 3:00	Desligado	Desligado
12-9-19 4:00	Desligado	Desligado
12-9-19 5:00	Desligado	Desligado
12-9-19 6:00	Desligado	Desligado
12-9-19 7:00	Desligado	Desligado

12-9-19 8:00	Desligado	Desligado
12-9-19 9:00	Desligado	Desligado
12-9-19 10:00	Desligado	Desligado
12-9-19 11:00	Desligado	Desligado
12-9-19 12:00	Ligado	Ligado
12-9-19 13:00	Desligado	Desligado
12-9-19 14:00	Desligado	Desligado
12-9-19 15:00	Desligado	Desligado
12-9-19 16:00	Desligado	Desligado
12-9-19 17:00	Desligado	Desligado
12-9-19 18:00	Desligado	Desligado
12-9-19 19:00	Desligado	Desligado
12-9-19 20:00	Desligado	Desligado
12-9-19 21:00	Desligado	Desligado
12-9-19 22:00	Desligado	Desligado
12-9-19 23:00	Desligado	Desligado
13-9-19 0:00	Desligado	Desligado
13-9-19 1:00	Desligado	Desligado
13-9-19 2:00	Desligado	Desligado
13-9-19 3:00	Desligado	Desligado
13-9-19 4:00	Desligado	Desligado
13-9-19 5:00	Desligado	Desligado
13-9-19 6:00	Desligado	Desligado
13-9-19 7:00	Desligado	Desligado
13-9-19 8:00	Desligado	Desligado
13-9-19 9:00	Desligado	Desligado
13-9-19 10:00	Desligado	Desligado
13-9-19 11:00	Desligado	Desligado
13-9-19 12:00	Desligado	Desligado
13-9-19 13:00	Desligado	Desligado
13-9-19 14:00	Desligado	Desligado
13-9-19 15:00	Ligado	Ligado
13-9-19 16:00	Desligado	Desligado
13-9-19 17:00	Desligado	Ligado
13-9-19 18:00	Desligado	Ligado
13-9-19 19:00	Desligado	Desligado
13-9-19 20:00	Desligado	Desligado
13-9-19 21:00	Desligado	Desligado
13-9-19 22:00	Desligado	Desligado
13-9-19 23:00	Desligado	Desligado

Tabela 19 – Tabela da resposta do sistema para a semana de 10 a 14 de agosto de 2020.

Data	PVEstado	EOEstado
10-8-20 0:00	Desligado	Ligado
10-8-20 1:00	Desligado	Ligado
10-8-20 2:00	Desligado	Ligado
10-8-20 3:00	Desligado	Desligado
10-8-20 4:00	Desligado	Desligado
10-8-20 5:00	Desligado	Desligado
10-8-20 6:00	Desligado	Desligado
10-8-20 7:00	Desligado	Ligado
10-8-20 8:00	Desligado	Ligado
10-8-20 9:00	Desligado	Desligado
10-8-20 10:00	Desligado	Desligado
10-8-20 11:00	Ligado	Ligado
10-8-20 12:00	Ligado	Ligado
10-8-20 13:00	Ligado	Ligado
10-8-20 14:00	Desligado	Desligado
10-8-20 15:00	Desligado	Desligado
10-8-20 16:00	Desligado	Desligado
10-8-20 17:00	Desligado	Desligado
10-8-20 18:00	Ligado	Ligado
10-8-20 19:00	Desligado	Desligado
10-8-20 20:00	Desligado	Ligado
10-8-20 21:00	Desligado	Desligado
10-8-20 22:00	Desligado	Desligado
10-8-20 23:00	Desligado	Desligado
11-8-20 0:00	Desligado	Desligado
11-8-20 1:00	Desligado	Desligado
11-8-20 2:00	Desligado	Desligado
11-8-20 3:00	Desligado	Desligado
11-8-20 4:00	Desligado	Desligado
11-8-20 5:00	Desligado	Desligado
11-8-20 6:00	Desligado	Desligado
11-8-20 7:00	Desligado	Desligado
11-8-20 8:00	Desligado	Desligado
11-8-20 9:00	Desligado	Desligado
11-8-20 10:00	Desligado	Desligado
11-8-20 11:00	Desligado	Desligado
11-8-20 12:00	Desligado	Desligado
11-8-20 13:00	Desligado	Desligado
11-8-20 14:00	Desligado	Desligado
11-8-20 15:00	Ligado	Ligado
11-8-20 16:00	Ligado	Ligado
11-8-20 17:00	Ligado	Ligado

11-8-20 18:00	Ligado	Ligado
11-8-20 19:00	Desligado	Ligado
11-8-20 20:00	Desligado	Ligado
11-8-20 21:00	Desligado	Desligado
11-8-20 22:00	Desligado	Desligado
11-8-20 23:00	Desligado	Desligado
12-8-20 0:00	Desligado	Desligado
12-8-20 1:00	Desligado	Desligado
12-8-20 2:00	Desligado	Desligado
12-8-20 3:00	Desligado	Desligado
12-8-20 4:00	Desligado	Desligado
12-8-20 5:00	Desligado	Desligado
12-8-20 6:00	Desligado	Desligado
12-8-20 7:00	Desligado	Desligado
12-8-20 8:00	Desligado	Desligado
12-8-20 9:00	Desligado	Desligado
12-8-20 10:00	Desligado	Desligado
12-8-20 11:00	Desligado	Desligado
12-8-20 12:00	Desligado	Desligado
12-8-20 13:00	Desligado	Desligado
12-8-20 14:00	Desligado	Desligado
12-8-20 15:00	Ligado	Ligado
12-8-20 16:00	Desligado	Desligado
12-8-20 17:00	Desligado	Desligado
12-8-20 18:00	Ligado	Ligado
12-8-20 19:00	Desligado	Desligado
12-8-20 20:00	Desligado	Desligado
12-8-20 21:00	Desligado	Desligado
12-8-20 22:00	Desligado	Desligado
12-8-20 23:00	Desligado	Ligado
13-8-20 0:00	Desligado	Desligado
13-8-20 1:00	Desligado	Desligado
13-8-20 2:00	Desligado	Desligado
13-8-20 3:00	Desligado	Ligado
13-8-20 4:00	Desligado	Ligado
13-8-20 5:00	Desligado	Desligado
13-8-20 6:00	Desligado	Desligado
13-8-20 7:00	Desligado	Desligado
13-8-20 8:00	Desligado	Desligado
13-8-20 9:00	Desligado	Desligado
13-8-20 10:00	Desligado	Desligado
13-8-20 11:00	Desligado	Desligado
13-8-20 12:00	Desligado	Desligado
13-8-20 13:00	Desligado	Desligado
13-8-20 14:00	Desligado	Desligado

13-8-20 15:00	Ligado	Ligado
13-8-20 16:00	Ligado	Ligado
13-8-20 17:00	Ligado	Ligado
13-8-20 18:00	Ligado	Ligado
13-8-20 19:00	Desligado	Ligado
13-8-20 20:00	Desligado	Desligado
13-8-20 21:00	Desligado	Desligado
13-8-20 22:00	Desligado	Desligado
13-8-20 23:00	Desligado	Desligado
14-8-20 0:00	Desligado	Desligado
14-8-20 1:00	Desligado	Desligado
14-8-20 2:00	Desligado	Ligado
14-8-20 3:00	Desligado	Desligado
14-8-20 4:00	Desligado	Desligado
14-8-20 5:00	Desligado	Ligado
14-8-20 6:00	Desligado	Desligado
14-8-20 7:00	Desligado	Desligado
14-8-20 8:00	Desligado	Desligado
14-8-20 9:00	Desligado	Desligado
14-8-20 10:00	Desligado	Desligado
14-8-20 11:00	Ligado	Ligado
14-8-20 12:00	Ligado	Ligado
14-8-20 13:00	Ligado	Ligado
14-8-20 14:00	Ligado	Ligado
14-8-20 15:00	Ligado	Ligado
14-8-20 16:00	Ligado	Ligado
14-8-20 17:00	Ligado	Ligado
14-8-20 18:00	Ligado	Ligado
14-8-20 19:00	Desligado	Ligado
14-8-20 20:00	Desligado	Ligado
14-8-20 21:00	Desligado	Desligado
14-8-20 22:00	Desligado	Ligado
14-8-20 23:00	Desligado	Desligado

Anexo C. Datasheets dos sistemas de geração de energia solar e eólica escolhidos

SunPower® E-Series Commercial Solar Panels | E20-435-COM

Helix™ Roof Compatible Modules

Factory-installed clips enable tool-free panel installation, decreasing installation time and minimizing business disruption.¹

More than 20% Efficiency

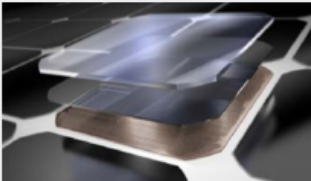
Captures more sunlight and generates more power than conventional panels.

High Performance

Delivers excellent performance in real-world conditions, such as high temperatures, clouds and low light.²

Commercial Grade

Optimized to maximize returns and energy production, the E-Series panel is a bankable solution for commercial solar applications.



Maxon® Solar Cells: Fundamentally better
Engineered for performance, designed for reliability.

Engineered for Peace of Mind


Designed to deliver consistent, trouble-free energy over a very long lifetime.³

Designed for Reliability

The SunPower Maxeon solar cell is the only cell built on a solid metal foundation. Virtually impervious to the corrosion and cracking that degrade conventional panels.

#1 Rank in Fraunhofer durability test.⁴

High Performance & Excellent Reliability

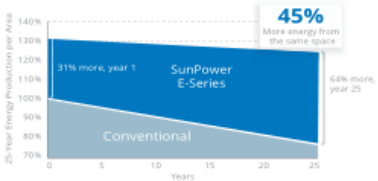



SPR-E20-435-COM

High Efficiency


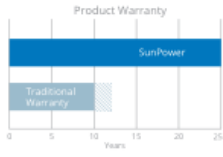
Generate more energy per square foot

More energy to power your system. E-Series residential systems convert more sunlight to electricity by producing 31% more energy in the first year. This advantage increases over time, producing 45% more energy over the first 25 years to meet your needs.²



Best Reliability, Best Warranty

A better warranty starts with a better product. Proven performance backs up our industry-best coverage, including our warranted 0.25% per year degradation rate.⁵

More guaranteed power: 98% for first year, -0.25%/yr. to year 25

Combined Power and Product defect 25-year coverage


Datasheet


Figura 97 – Primeira página do *datasheet* do painel fotovoltaico SunPower E20-435-COM [38].

SunPower® E-Series Commercial Solar Panels | E20-435-COM

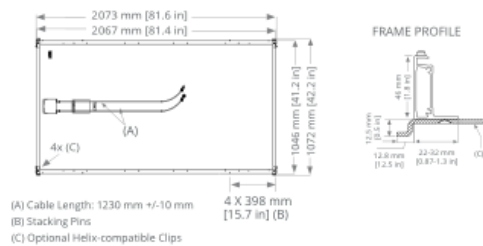
Electrical Data	
SPR-E20-435-COM	
Nominal Power (P _{nom}) ⁶	435 W
Power Tolerance	+5/-3%
Avg. Panel Efficiency ⁷	20.3%
Rated Voltage (V _{mpp})	72.9 V
Rated Current (I _{mpp})	5.97 A
Open-Circuit Voltage (V _{oc})	85.6 V
Short-Circuit Current (I _{sc})	6.43 A
Max. System Voltage	1500 V UL & 1000 V IEC
Maximum Series Fuse	15 A
Power Temp Coef.	-0.35% / °C
Voltage Temp Coef.	-235.5 mV / °C
Current Temp Coef.	2.6 mA / °C

Operating Condition And Mechanical Data	
Temperature	-40° F to +185° F (-40° C to +85° C)
Impact Resistance	1 inch (25 mm) diameter hail at 52 mph (23 m/s)
Appearance	Class B
Solar Cells	128 Monocrystalline Maxeon Gen II
Tempered Glass	High-transmission tempered anti-reflective
Junction Box	IP-65, MC4 compatible
Weight	56 lbs (25.4 kg)
Max. Load	Wind: 50 psf, 2400 Pa front & back Snow: 112 psf, 5400 Pa front
Frame	Class 2 silver anodized; stacking pins

Tests And Certifications	
Standard Tests ⁸	UL1703 (Type 2 Fire Rating), IEC 61215, IEC 61730
Management System Certs	ISO 9001:2015, ISO 14001:2015
EHS Compliance	RoHS, OHSAS 18001:2007, lead free, REACH SVHC-163, PV Cycle
Ammonia Test	IEC 62716
Desert Test	10.1109/PVSC.2013.6744437
Salt Spray Test	IEC 61701 (maximum severity)
PID Test	1000V: IEC62804, PVEL 600hr duration
Available Listings	UL, TUV, MCS, CSA, FSEC

REFERENCES:

- Helix-compatible modules may not be compatible with other racking systems.
- SunPower 327W compared to a Conventional Panel on same sized arrays (260W, 16% efficient, approx. 1.6 m2), 39% more energy per watt (based on 3p7y module characterization and PVSim), 0.75%/yr slower degradation (Compeau, Z. et al. "SunPower Module Degradation Rate," SunPower white paper, 2013).
- "SunPower Module 40-Year Useful Life" SunPower white paper, May 2015. Useful life is 99 out of 100 panels operating at more than 70% of rated power.
- 4X-Series same as E-Series, 5 of top 8 panel manufacturers tested in 2013 report, 3 additional panels in 2014. Ferrara, C., et al. "Fraunhofer PV Durability Initiative for Solar Modules: Part 2". Photovoltaics International, 2014.
- See us.sunpower.com/commercial-solar/products/panel-warranty for more details.
- Standard Test Conditions (1000 W/m² irradiance, AM 1.5, 25° C), NREL calibration Standard: 50MS current, LACCS FF and Voltage.
- Based on average of measured power values during production.
- Type 2 fire rating per UL1703:2013, Class C fire rating per UL1703:2002.



Please read the safety and installation guide.

Document # 521912 Rev B A,TR_US

©September 2017 SunPower Corporation. All rights reserved. SUNPOWER, the SUNPOWER logo, MAXEON and Helix are trademarks or registered trademarks of SunPower Corporation. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

SUNPOWER®

Figura 98 – Segunda página do *datasheet* do painel fotovoltaico SunPower E20-435-COM [38].



USER MANUAL

- Keep handy at the place of use

TESUP Master940

Wind Turbines

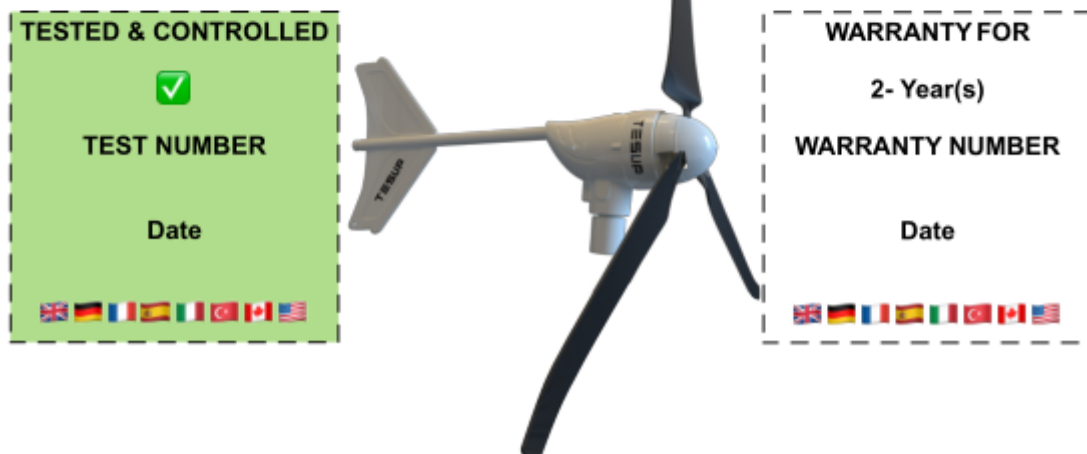


Figura 99 – Capa do manual de utilizador do aerogerador TESUP Master940 [37].

4 Technical data

Designation	12 V	24 V	48 V
Generator			
Type	Permanent magnet rotor, brushless, direct drive, maintenance- free		
Weight [kg]	9 KG		
Max. power	940 Watts (15 m/s)		
Open circuit voltage [VAC]	0-330 Volts		
Current	3 Phase		
Start of charging	3 m/s (10.8 km/h and 6.7 mi/h)		
Housing material	Aluminium (one piece casted ✓)		
Direction of rotation	Front right		
Test standard	EN 61000-6-1 (electromagnetic compatibility – immunity) EN 61000-6-3 (electromagnetic compatibility – emissions)		
Rotor blades			
Hub flange	Aluminium		
Diameter, approx. [m]	1600 mm blade diameter		
Length per repeller (cm)	369 mm (body) + 549 mm (tail)		
Weight per rotor blade, [g]	200 carbon granules		
Direction of rotation	Clockwise, looking from front end		
Max. speed [rpm]	Turbine operates 300 to 1500 rpm		
Max. speed [m/s]	27 (Storm: Brake is recommended)		
Noise emissions [dB(A)]	35		

Table 7 Technical data

Figura 100 – Características técnicas do aerogerador, localizadas na página 8 do manual de utilizador do aerogerador TESUP Master940 [37].

Anexo D. Código de configuração do modelo *fuzzy*

```
[System]
Name='EnergiaFuzzyCons3'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=4
NumOutputs=3
NumRules=388
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='lom'

[Input1]
Name='TEMPERATURA'
Range=[-5 40]
NumMFs=5
MF1='MuitoBaixo':'trimf',[-16.3 -5 6.25]
MF2='Baixo':'trimf',[-4.999 6.25 17.5]
MF3='Ameno':'trimf',[6.25 17.7 28.75]
MF4='Alto':'trimf',[17.5 28.75 40]
MF5='MuitoAlto':'trimf',[28.75 40 51.25]

[Input2]
Name='IRRADIANCIA'
Range=[0 1200]
NumMFs=5
MF1='MuitoFraco':'trimf',[-300 -3.55e-15 411.1111111111111]
MF2='Fraco':'trimf',[-0.004074 300 600]
MF3='Médio':'trimf',[315.873015873016 615.873015873016 852.873015873016]
MF4='Alto':'trimf',[565.269841269841 865.269841269841 1161.26984126984]
MF5='MuitoAlto':'trimf',[417.460317460317 1200 1500]

[Input3]
Name='VENTO'
Range=[3 27]
NumMFs=5
MF1='MuitoFraco':'trimf',[-3 3 14.3968253968254]
MF2='Fraco':'trimf',[4.17460317460318 13.5 19.5]
MF3='Médio':'trimf',[10.2952380952381 16.2952380952381 22.2952380952381]
MF4='Forte':'trimf',[17.0460317460317 23.0460317460317 29.0460317460317]
MF5='MuitoForte':'trimf',[21.2 27 33]

[Input4]
Name='CONSUMO'
Range=[0 1375]
NumMFs=5
MF1='MuitoBaixo':'trimf',[-343.8 0 343.8]
MF2='Baixo':'trimf',[-0.003727 343.8 687.6]
MF3='Moderado':'trimf',[343.7 687.5 1031]
MF4='Alto':'trimf',[687.2 1031 1375]
MF5='MuitoAlto':'trimf',[1031 1375 1719]
```

```
[Output1]
Name='SOLAR'
Range=[0 435]
NumMFs=5
MF1='MuitoPouco':'trimf',[-108.8 0 108.8]
MF2='Pouco':'trimf',[11.5079365079365 120.307936507937 229.007936507937]
MF3='Suficiente':'trimf',[92.6952380952381 202.095238095238 311.095238095238]
MF4='Alto':'trimf',[187.738095238095 296.738095238095 404.738095238095]
MF5='MuitoAlto':'trimf',[310.138888888889 435 544]
```

```
[Output2]
Name='EOLICA'
Range=[0 940]
NumMFs=5
MF1='MuitoPouco':'trimf',[-235 0 235]
MF2='Pouco':'trimf',[0 235 470]
MF3='Suficiente':'trimf',[235 470 705]
MF4='Alto':'trimf',[470 705 940]
MF5='MuitoAlto':'trimf',[705 940 1175]
```

```
[Output3]
Name='REDE'
Range=[0 1375]
NumMFs=9
MF1='mf1':'trimf',[-171.9 0 171.9]
MF2='mf2':'trimf',[0 171.9 343.8]
MF3='mf3':'trimf',[171.9 343.8 515.6]
MF4='mf4':'trimf',[343.8 515.6 687.5]
MF5='mf5':'trimf',[515.6 687.5 859.4]
MF6='mf6':'trimf',[687.5 859.4 1031]
MF7='mf7':'trimf',[859.4 1031 1203]
MF8='mf8':'trimf',[1031 1203 1375]
MF9='mf9':'trimf',[1203 1375 1547]
```

```
[Rules]
1 1 1 1, 1 1 1 (1) : 1
1 1 1 2, 1 1 1 (1) : 1
1 1 1 3, 1 1 1 (1) : 1
1 1 1 4, 1 1 1 (1) : 1
1 1 1 5, 1 1 1 (1) : 1
2 1 1 1, 1 1 1 (1) : 1
2 1 1 2, 1 1 1 (1) : 1
2 1 1 3, 1 1 1 (1) : 1
2 1 1 4, 1 1 1 (1) : 1
2 1 1 5, 1 1 1 (1) : 1
3 1 1 1, 1 1 1 (1) : 1
3 1 1 2, 1 1 1 (1) : 1
3 1 1 3, 1 1 1 (1) : 1
3 1 1 4, 1 1 1 (1) : 1
3 1 1 5, 1 1 1 (1) : 1
4 1 1 1, 1 1 1 (1) : 1
4 1 1 2, 1 1 1 (1) : 1
4 1 1 3, 1 1 1 (1) : 1
4 1 1 4, 1 1 1 (1) : 1
4 1 1 5, 1 1 1 (1) : 1
5 1 1 1, 1 1 1 (1) : 1
```

5 1 1 2, 1 1 1 (1) : 1
 5 1 1 3, 1 1 1 (1) : 1
 5 1 1 4, 1 1 1 (1) : 1
 5 1 1 5, 1 1 1 (1) : 1
 1 2 1 1, 2 1 1 (1) : 1
 1 3 1 1, 3 1 2 (1) : 1
 1 4 1 1, 4 1 2 (1) : 1
 1 5 1 1, 5 1 3 (1) : 1
 2 2 1 1, 2 1 1 (1) : 1
 2 3 1 1, 2 1 1 (1) : 1
 2 4 1 1, 3 1 2 (1) : 1
 2 5 1 1, 4 1 2 (1) : 1
 3 2 1 1, 1 1 1 (1) : 1
 3 3 1 1, 2 1 1 (1) : 1
 3 4 1 1, 3 1 2 (1) : 1
 3 5 1 1, 4 1 2 (1) : 1
 4 2 1 1, 1 1 1 (1) : 1
 4 3 1 1, 2 1 1 (1) : 1
 4 4 1 1, 3 1 2 (1) : 1
 4 5 1 1, 3 1 2 (1) : 1
 5 2 1 1, 1 1 1 (1) : 1
 5 3 1 1, 2 1 1 (1) : 1
 5 4 1 1, 3 1 1 (1) : 1
 5 5 1 1, 3 1 2 (1) : 1
 1 2 1 2, 2 1 1 (1) : 1
 1 3 1 2, 3 1 1 (1) : 1
 1 4 1 2, 4 1 1 (1) : 1
 1 5 1 2, 5 1 1 (1) : 1
 2 2 1 2, 2 1 1 (1) : 1
 2 3 1 2, 2 1 1 (1) : 1
 2 4 1 2, 3 1 1 (1) : 1
 2 5 1 2, 4 1 1 (1) : 1
 3 2 1 2, 2 1 1 (1) : 1
 3 3 1 2, 2 1 1 (1) : 1
 3 4 1 2, 3 1 1 (1) : 1
 3 5 1 2, 4 1 1 (1) : 1
 4 2 1 2, 1 1 1 (1) : 1
 4 3 1 2, 2 1 1 (1) : 1
 4 4 1 2, 3 1 1 (1) : 1
 4 5 1 2, 3 1 1 (1) : 1
 5 2 1 2, 1 1 1 (1) : 1
 5 3 1 2, 2 1 1 (1) : 1
 5 4 1 2, 2 1 1 (1) : 1
 5 5 1 2, 3 1 1 (1) : 1
 1 2 1 3, 2 1 1 (1) : 1
 1 3 1 3, 3 1 1 (1) : 1
 1 4 1 3, 4 1 1 (1) : 1
 1 5 1 3, 5 1 1 (1) : 1
 2 2 1 3, 2 1 1 (1) : 1
 2 3 1 3, 2 1 1 (1) : 1
 2 4 1 3, 3 1 1 (1) : 1
 2 5 1 3, 4 1 1 (1) : 1
 3 2 1 3, 2 1 1 (1) : 1
 3 3 1 3, 2 1 1 (1) : 1
 3 4 1 3, 3 1 1 (1) : 1
 3 5 1 3, 4 1 1 (1) : 1
 4 2 1 3, 2 1 1 (1) : 1

4 3 1 3, 2 1 1 (1) : 1
 4 4 1 3, 3 1 1 (1) : 1
 4 5 1 3, 3 1 1 (1) : 1
 5 2 1 3, 2 1 1 (1) : 1
 5 3 1 3, 2 1 1 (1) : 1
 5 4 1 3, 2 1 1 (1) : 1
 5 5 1 3, 3 1 1 (1) : 1
 1 2 1 4, 2 1 1 (1) : 1
 1 3 1 4, 3 1 1 (1) : 1
 1 4 1 4, 4 1 1 (1) : 1
 1 5 1 4, 5 1 1 (1) : 1
 2 2 1 4, 2 1 1 (1) : 1
 2 3 1 4, 2 1 1 (1) : 1
 2 4 1 4, 3 1 1 (1) : 1
 2 5 1 4, 4 1 1 (1) : 1
 3 2 1 4, 2 1 1 (1) : 1
 3 3 1 4, 2 1 1 (1) : 1
 3 4 1 4, 3 1 1 (1) : 1
 3 5 1 4, 4 1 1 (1) : 1
 4 2 1 4, 2 1 1 (1) : 1
 4 3 1 4, 2 1 1 (1) : 1
 4 4 1 4, 3 1 1 (1) : 1
 4 5 1 4, 3 1 1 (1) : 1
 5 2 1 4, 1 1 1 (1) : 1
 5 3 1 4, 2 1 1 (1) : 1
 5 4 1 4, 2 1 1 (1) : 1
 5 5 1 4, 3 1 1 (1) : 1
 1 2 1 5, 2 1 1 (1) : 1
 1 3 1 5, 3 1 1 (1) : 1
 1 4 1 5, 4 1 1 (1) : 1
 1 5 1 5, 5 1 1 (1) : 1
 2 2 1 5, 2 1 1 (1) : 1
 2 3 1 5, 2 1 1 (1) : 1
 2 4 1 5, 3 1 1 (1) : 1
 2 5 1 5, 4 1 1 (1) : 1
 3 2 1 5, 2 1 1 (1) : 1
 3 3 1 5, 2 1 1 (1) : 1
 3 4 1 5, 3 1 1 (1) : 1
 3 5 1 5, 4 1 1 (1) : 1
 4 2 1 5, 1 1 1 (1) : 1
 4 3 1 5, 2 1 1 (1) : 1
 4 4 1 5, 3 1 1 (1) : 1
 4 5 1 5, 3 1 1 (1) : 1
 5 2 1 5, 1 1 1 (1) : 1
 5 3 1 5, 2 1 1 (1) : 1
 5 4 1 5, 2 1 1 (1) : 1
 5 5 1 5, 3 1 1 (1) : 1
 1 1 2 1, 1 2 2 (1) : 1
 1 1 3 1, 1 3 3 (1) : 1
 1 1 4 1, 1 4 5 (1) : 1
 1 1 5 1, 1 5 6 (1) : 1
 2 1 2 1, 1 2 2 (1) : 1
 2 1 3 1, 1 3 3 (1) : 1
 2 1 4 1, 1 4 4 (1) : 1
 2 1 5 1, 1 5 6 (1) : 1
 3 1 2 1, 1 2 2 (1) : 1

3 1 4 1, 1 4 4 (1) : 1
 3 1 5 1, 1 5 6 (1) : 1
 4 1 2 1, 1 2 2 (1) : 1
 4 1 3 1, 1 3 3 (1) : 1
 4 1 4 1, 1 4 4 (1) : 1
 4 1 5 1, 1 5 6 (1) : 1
 5 1 2 1, 1 1 1 (1) : 1
 5 1 3 1, 1 2 2 (1) : 1
 5 1 4 1, 1 3 3 (1) : 1
 5 1 5 1, 1 4 4 (1) : 1
 1 1 2 2, 1 2 1 (1) : 1
 1 1 3 2, 1 3 2 (1) : 1
 1 1 4 2, 1 4 3 (1) : 1
 1 1 5 2, 1 5 4 (1) : 1
 2 1 2 2, 1 2 1 (1) : 1
 2 1 3 2, 1 3 2 (1) : 1
 2 1 4 2, 1 4 3 (1) : 1
 2 1 5 2, 1 5 4 (1) : 1
 3 1 2 2, 1 2 1 (1) : 1
 3 1 3 2, 1 3 2 (1) : 1
 3 1 4 2, 1 4 3 (1) : 1
 3 1 5 2, 1 5 4 (1) : 1
 4 1 2 2, 1 2 1 (1) : 1
 4 1 3 2, 1 3 2 (1) : 1
 4 1 4 2, 1 4 3 (1) : 1
 4 1 5 2, 1 5 4 (1) : 1
 5 1 2 2, 1 2 1 (1) : 1
 5 1 3 2, 1 2 1 (1) : 1
 5 1 4 2, 1 3 1 (1) : 1
 5 1 5 2, 1 4 3 (1) : 1
 1 1 2 3, 1 2 1 (1) : 1
 1 1 3 3, 1 3 1 (1) : 1
 1 1 4 3, 1 4 2 (1) : 1
 1 1 5 3, 1 5 3 (1) : 1
 2 1 2 3, 1 2 1 (1) : 1
 2 1 3 3, 1 2 2 (1) : 1
 2 1 4 3, 1 3 2 (1) : 1
 2 1 5 3, 1 4 3 (1) : 1
 3 1 2 3, 1 2 1 (1) : 1
 3 1 3 3, 1 2 2 (1) : 1
 3 1 4 3, 1 3 2 (1) : 1
 3 1 5 3, 1 5 3 (1) : 1
 4 1 2 3, 1 1 1 (1) : 1
 4 1 3 3, 1 2 2 (1) : 1
 4 1 4 3, 1 3 2 (1) : 1
 4 1 5 3, 1 5 2 (1) : 1
 5 1 2 3, 1 1 1 (1) : 1
 5 1 3 3, 1 1 1 (1) : 1
 5 1 4 3, 1 2 1 (1) : 1
 5 1 5 3, 1 3 1 (1) : 1
 1 1 2 4, 1 1 1 (1) : 1
 1 1 3 4, 1 2 1 (1) : 1
 1 1 4 4, 1 3 1 (1) : 1
 1 1 5 4, 1 5 2 (1) : 1
 2 1 2 4, 1 1 1 (1) : 1
 2 1 3 4, 1 2 1 (1) : 1
 2 1 4 4, 1 3 1 (1) : 1

2 1 5 4, 1 5 2 (1) : 1
 3 1 2 4, 1 1 1 (1) : 1
 3 1 3 4, 1 2 1 (1) : 1
 3 1 4 4, 1 3 1 (1) : 1
 3 1 5 4, 1 5 1 (1) : 1
 4 1 2 4, 1 1 1 (1) : 1
 4 1 3 4, 1 2 1 (1) : 1
 4 1 4 4, 1 3 1 (1) : 1
 4 1 5 4, 1 4 1 (1) : 1
 5 1 2 4, 1 1 1 (1) : 1
 5 1 3 4, 1 2 1 (1) : 1
 5 1 4 4, 1 3 1 (1) : 1
 5 1 5 4, 1 4 1 (1) : 1
 1 1 2 5, 1 2 1 (1) : 1
 1 1 3 5, 1 3 1 (1) : 1
 1 1 4 5, 1 4 1 (1) : 1
 1 1 5 5, 1 5 1 (1) : 1
 2 1 2 5, 1 2 1 (1) : 1
 2 1 3 5, 1 3 1 (1) : 1
 2 1 4 5, 1 4 1 (1) : 1
 2 1 5 5, 1 5 1 (1) : 1
 3 1 2 5, 1 2 1 (1) : 1
 3 1 3 5, 1 3 1 (1) : 1
 3 1 4 5, 1 4 1 (1) : 1
 3 1 5 5, 1 5 1 (1) : 1
 4 1 2 5, 1 2 1 (1) : 1
 4 1 3 5, 1 3 1 (1) : 1
 4 1 4 5, 1 4 1 (1) : 1
 4 1 5 5, 1 5 1 (1) : 1
 5 1 2 5, 1 1 1 (1) : 1
 5 1 3 5, 1 2 1 (1) : 1
 5 1 4 5, 1 3 1 (1) : 1
 5 1 5 5, 1 4 1 (1) : 1
 3 2 2 1, 2 2 1 (1) : 1
 1 2 2 1, 2 2 4 (1) : 1
 2 2 2 1, 2 2 4 (1) : 1
 3 2 2 1, 2 2 4 (1) : 1
 4 2 2 1, 2 2 4 (1) : 1
 5 2 2 1, 1 2 3 (1) : 1
 3 2 2 1, 2 2 2 (1) : 1
 1 2 3 1, 2 3 4 (1) : 1
 2 2 3 1, 2 3 4 (1) : 1
 3 2 3 1, 2 3 4 (1) : 1
 4 2 3 1, 2 3 4 (1) : 1
 5 2 3 1, 1 3 3 (1) : 1
 1 2 4 1, 2 4 6 (1) : 1
 2 2 4 1, 2 4 6 (1) : 1
 3 2 4 1, 2 4 6 (1) : 1
 4 2 4 1, 2 4 6 (1) : 1
 5 2 4 1, 1 4 5 (1) : 1
 1 2 5 1, 2 5 7 (1) : 1
 2 2 5 1, 2 5 7 (1) : 1
 3 2 5 1, 2 5 7 (1) : 1
 4 2 5 1, 2 5 7 (1) : 1
 5 2 5 1, 1 5 6 (1) : 1
 1 3 2 1, 3 2 3 (1) : 1
 2 3 2 1, 3 2 3 (1) : 1

3 3 2 1, 3 2 3 (1) : 1
 4 3 2 1, 3 2 4 (1) : 1
 5 3 2 1, 2 2 3 (1) : 1
 1 3 3 1, 3 3 5 (1) : 1
 2 3 3 1, 3 3 5 (1) : 1
 3 3 3 1, 3 3 4 (1) : 1
 4 3 3 1, 3 3 4 (1) : 1
 5 3 3 1, 2 3 4 (1) : 1
 1 3 4 1, 3 4 6 (1) : 1
 2 3 4 1, 3 4 6 (1) : 1
 3 3 4 1, 3 4 6 (1) : 1
 4 3 4 1, 3 4 6 (1) : 1
 5 3 4 1, 2 4 5 (1) : 1
 1 3 5 1, 3 5 7 (1) : 1
 2 3 5 1, 3 5 7 (1) : 1
 3 3 5 1, 3 5 7 (1) : 1
 4 3 5 1, 3 5 7 (1) : 1
 5 3 5 1, 2 5 6 (1) : 1
 1 4 2 1, 4 2 4 (1) : 1
 2 4 2 1, 4 2 4 (1) : 1
 3 4 2 1, 4 2 4 (1) : 1
 4 4 2 1, 4 2 4 (1) : 1
 5 4 2 1, 3 2 3 (1) : 1
 1 4 3 1, 4 3 5 (1) : 1
 2 4 3 1, 4 3 5 (1) : 1
 3 4 3 1, 4 3 5 (1) : 1
 4 4 3 1, 4 3 5 (1) : 1
 5 4 3 1, 3 3 4 (1) : 1
 1 4 4 1, 4 4 6 (1) : 1
 2 4 4 1, 4 4 6 (1) : 1
 3 4 4 1, 4 4 6 (1) : 1
 4 4 4 1, 4 4 6 (1) : 1
 5 4 4 1, 3 4 5 (1) : 1
 1 4 5 1, 4 5 7 (1) : 1
 2 4 5 1, 4 5 7 (1) : 1
 3 4 5 1, 4 5 7 (1) : 1
 4 4 5 1, 4 5 7 (1) : 1
 5 4 5 1, 3 5 6 (1) : 1
 1 5 2 1, 5 2 4 (1) : 1
 2 5 2 1, 5 2 4 (1) : 1
 3 5 2 1, 5 2 4 (1) : 1
 4 5 2 1, 5 2 4 (1) : 1
 5 5 2 1, 4 2 3 (1) : 1
 1 5 3 1, 5 3 6 (1) : 1
 2 5 3 1, 5 3 6 (1) : 1
 3 5 3 1, 5 3 6 (1) : 1
 4 5 3 1, 5 3 6 (1) : 1
 5 5 3 1, 4 3 5 (1) : 1
 1 5 4 1, 5 4 7 (1) : 1
 2 5 4 1, 5 4 7 (1) : 1
 3 5 4 1, 5 4 7 (1) : 1
 4 5 4 1, 5 4 7 (1) : 1
 5 5 4 1, 4 4 6 (1) : 1
 1 5 5 1, 5 5 9 (1) : 1
 2 5 5 1, 5 5 9 (1) : 1
 3 5 5 1, 5 5 9 (1) : 1
 4 5 5 1, 5 5 9 (1) : 1

5 5 5 1, 4 5 8 (1) : 1
 1 2 2 2, 2 2 3 (1) : 1
 2 2 2 2, 2 2 3 (1) : 1
 3 2 2 2, 2 2 3 (1) : 1
 4 2 2 2, 2 2 3 (1) : 1
 5 2 2 2, 1 2 2 (1) : 1
 3 2 2 2, 2 2 1 (1) : 1
 1 2 3 2, 2 3 3 (1) : 1
 2 2 3 2, 2 3 3 (1) : 1
 3 2 3 2, 2 3 3 (1) : 1
 4 2 3 2, 2 3 3 (1) : 1
 5 2 3 2, 1 3 2 (1) : 1
 1 2 4 2, 2 4 5 (1) : 1
 2 2 4 2, 2 4 5 (1) : 1
 3 2 4 2, 2 4 5 (1) : 1
 4 2 4 2, 2 4 5 (1) : 1
 5 2 4 2, 1 4 4 (1) : 1
 1 2 5 2, 2 5 6 (1) : 1
 2 2 5 2, 2 5 6 (1) : 1
 3 2 5 2, 2 5 6 (1) : 1
 4 2 5 2, 2 5 6 (1) : 1
 5 2 5 2, 1 5 5 (1) : 1
 1 3 2 2, 3 2 3 (1) : 1
 2 3 2 2, 3 2 3 (1) : 1
 3 3 2 2, 3 2 3 (1) : 1
 4 3 2 2, 3 2 3 (1) : 1
 5 3 2 2, 2 2 2 (1) : 1
 1 3 3 2, 3 3 4 (1) : 1
 2 3 3 2, 3 3 4 (1) : 1
 3 3 3 2, 3 3 4 (1) : 1
 4 3 3 2, 3 3 4 (1) : 1
 5 3 3 2, 2 3 3 (1) : 1
 1 3 4 2, 3 4 5 (1) : 1
 2 3 4 2, 3 4 5 (1) : 1
 3 3 4 2, 3 4 5 (1) : 1
 4 3 4 2, 3 4 5 (1) : 1
 5 3 4 2, 2 4 4 (1) : 1
 1 3 5 2, 3 5 6 (1) : 1
 2 3 5 2, 3 5 6 (1) : 1
 3 3 5 2, 3 5 6 (1) : 1
 4 3 5 2, 3 5 6 (1) : 1
 5 3 5 2, 2 5 5 (1) : 1
 1 4 2 2, 4 2 3 (1) : 1
 2 4 2 2, 4 2 3 (1) : 1
 3 4 2 2, 4 2 3 (1) : 1
 4 4 2 2, 4 2 3 (1) : 1
 5 4 2 2, 3 2 2 (1) : 1
 1 4 3 2, 4 3 4 (1) : 1
 2 4 3 2, 4 3 4 (1) : 1
 3 4 3 2, 4 3 4 (1) : 1
 4 4 3 2, 4 3 4 (1) : 1
 5 4 3 2, 3 3 3 (1) : 1
 1 4 4 2, 4 4 5 (1) : 1
 2 4 4 2, 4 4 5 (1) : 1
 3 4 4 2, 4 4 5 (1) : 1
 4 4 4 2, 4 4 5 (1) : 1
 5 4 4 2, 3 4 4 (1) : 1

1 4 5 2, 4 5 6 (1) : 1
2 4 5 2, 4 5 6 (1) : 1
3 4 5 2, 4 5 6 (1) : 1
4 4 5 2, 4 5 6 (1) : 1
5 4 5 2, 3 5 5 (1) : 1
1 5 2 2, 5 2 3 (1) : 1
2 5 2 2, 5 2 3 (1) : 1
3 5 2 2, 5 2 3 (1) : 1
4 5 2 2, 5 2 3 (1) : 1
5 5 2 2, 4 2 2 (1) : 1
1 5 3 2, 5 3 5 (1) : 1
2 5 3 2, 5 3 5 (1) : 1
3 5 3 2, 5 3 5 (1) : 1
4 5 3 2, 5 3 5 (1) : 1
5 5 3 2, 4 3 4 (1) : 1
1 5 4 2, 5 4 6 (1) : 1
2 5 4 2, 5 4 6 (1) : 1
3 5 4 2, 5 4 6 (1) : 1
4 5 4 2, 5 4 6 (1) : 1
5 5 4 2, 4 4 5 (1) : 1
1 5 5 2, 5 5 8 (1) : 1
2 5 5 2, 5 5 8 (1) : 1
3 5 5 2, 5 5 8 (1) : 1
4 5 5 2, 5 5 8 (1) : 1
5 5 5 2, 4 5 7 (1) : 1