



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

**VÍTOR MANUEL FOLHA DIAS**

Novembro de 2022

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

Victor Manuel Folha Dias

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: Victor Manuel Folha Dias, Nº 1080035, 1080035@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professora Doutora 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

**2022**



Aos meus filhos, Vasco e Clara, e à minha esposa Carla.



## *Agradecimentos*

Agradeço à Doutora Isabel de Jesus a oportunidade de desenvolver o projeto e por me fazer acreditar que existe sempre uma possibilidade de chegar ao fim.



## *Resumo*

A dissertação tem por objetivo propor o desenvolvimento de um controlador difuso que efetue o controlo de um pequeno sistema de produção de energia renovável. Para tal, foi desenvolvida uma aplicação de *software*, que através de sistemas de inferência difusa efetua o controlo deste tipo de sistemas de produção de energia, recorrendo às potencialidades das livrarias do *Matlab*.

O sistema apresenta soluções com e sem incorporação de um sistema difuso, sendo tecidas as respetivas conclusões.

Este sistema visa ser implementado numa habitação, recorrendo a um sistema de energia renovável híbrido.

## *Palavras-Chave*

Energia fotovoltaica, Energia eólica, Energia Renovável, Sistema híbrido, Lógica difusa.



## *Abstract*

The dissertation aims to propose the development of a fuzzy controller that controls a small renewable energy production system. For this goal, a software application was developed, which, through diffuse inference systems, controls this type of energy production systems, using the potential of *Matlab* libraries.

The system presents solutions with and without incorporation of a diffuse system, and the respective conclusions are drawn.

This system is being implemented in a home, using a hybrid renewable energy system.

Keywords

Photovoltaic energy, Wind energy, Renewable Energy, Hybrid system, Fuzzy logic.



# Índice

AGRADECIMENTOS .....	VII
RESUMO .....	IX
PALAVRAS-CHAVE .....	IX
ABSTRACT .....	XI
KEYWORDS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIX
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	3
1.2.OBJETIVOS.....	5
1.3.CALENDARIZAÇÃO .....	6
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	6
<b>2. PRODUÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E EÓLICA .....</b>	<b>7</b>
2.1ESTADO DA ARTE.....	7
2.2ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	10
2.3ENERGIA EÓLICA .....	12
2.4IMPORTÂNCIA DA ENERGIA SOLAR E EÓLICA NO NOSSO CONSUMO.....	14
2.5VARIAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	18
<b>3. RECURSOS RENOVÁVEIS E TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO .....</b>	<b>21</b>
3.1ENERGIA SOLAR .....	21
3.2SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	24
3.2.1SISTEMAS ISOLADOS .....	25
3.2.2SISTEMAS HÍBRIDOS .....	25
3.2.3SISTEMAS AUTÓNOMOS .....	25
3.2.3.1SISTEMAS AUTÓNOMOS SEM ARMAZENAMENTO .....	26
3.2.3.1.1COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO .....	26
3.2.4SISTEMAS LIGADOS À REDE (ONGRID) .....	27
3.3ENERGIA EÓLICA .....	28
3.3.1OS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR.....	30
3.3.1.1IMPACTOS .....	33
<b>4. LÓGICA DIFUSA (FUZZY LOGIC) .....</b>	<b>35</b>

4.1. FUZZIFICAÇÃO .....	36
4.2. REGRAS FUZZY .....	38
4.3. INFERÊNCIA .....	38
4.4. DEFUZZIFICAÇÃO .....	42
<b>5. MODELAÇÃO E CONTROLO – RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>45</b>
5.1. CÉLULA FOTOVOLTAICA .....	45
5.2. AEROGERADORES .....	47
5.3. MODELO SIMULINK DE LÓGICA DIFUSA ( <i>FUZZY LOGIC</i> ) .....	48
5.4. RESULTADOS .....	59
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS .....	65

## Índice de Figuras

Figura 1 - Turbina eólica RidgeBlade [4].	10
Figura 2 – Central Fotovoltaica [5].	11
Figura 3 - Parque Eólico [6].	14
Figura 4 – Fontes de energia [7].	14
Figura 5 – Consumo e produção por fonte de energia [8].	15
Figura 6 – A energia do vento [9].	17
Figura 7 – Percentagem de energia renovável [10].	17
Figura 8 – Fator de capacidade Solar e Eólica [11].	19
Figura 9 – Espectro da radiação eletromagnética [12].	22
Figura 10 – Radiação solar [13].	23
Figura 11 – Sistemas fotovoltaicos [14].	24
Figura 12 – Sistema residencial autónomo [15].	26
Figura 13 – Sistemas ligados à rede [16].	27
Figura 14 – Turbina eólica conectada à rede [18].	30
Figura 15 – Componentes de um aerogerador [19].	31
Figura 16 – Controlador <i>fuzzy</i> . [20]	36
Figura 17 – Pertinência para o conjunto de estatura baixa [21].	37
Figura 18 - Função de pertinência para a altura [24].	39
Figura 19 – Função de pertinência para o peso [25].	40

Figura 20 – Função de pertinência para o tamanho [26].	40
Figura 21 – Região resultante da 2ª regra [27].	41
Figura 22 – Região resultante da 3ª regra [28].	41
Figura 23 – Região resultante para o tamanho [29].	42
Figura 24 – Saída <i>crisp</i> [30].	42
Figura 25 – Circuito elétrico célula fotovoltaica [32].	46
Figura 26 - Área de varrimento	47
Figura 27 – Ponto de Máxima Potência [39].	49
Figura 28 – Diagrama de blocos do modelo híbrido a implementar em Simulink.	50
Figura 29 – Modelo principal do sistema em Simulink.	51
Figura 30 – Controlador <i>fuzzy</i> .	52
Figura 31 – Fluxograma do cálculo das variáveis <i>fuzzy</i> .	53
Figura 32 – Implementação do algoritmo <i>fuzzy</i> em Simulink	54
Figura 33 – Variável difusa de entrada - Erro.	55
Figura 34 – Variável difusa de entrada - Variação do Erro.	56
Figura 35 – Variável difusa de saída – Ciclo de Trabalho.	56
Figura 36 – Implementação das regras <i>fuzzy</i> .	57
Figura 37 – Visualização gráfica das regras <i>fuzzy</i> .	58
Figura 38 - Gráfico dos resultados <i>fuzzy</i> da variável de saída <b>D</b> , face aos valores	59
Figura 39 – Gráfico da Tensão, Corrente e Potência dos painéis fotovoltaicos.	60

Figura 40 – Gráfico da Potência do sistema eólico.	60
Figura 41 – Gráfico da Tensão, Corrente e Potência da carga.	61
Figura 42 – Gráfico da Tensão, Corrente e Potência da Rede.	62



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 – Calendarização do projeto	6
Tabela 2 – Funcionamento do algoritmo MPPT	49
Tabela 3 – Variáveis de entrada e de saída do controlador de lógica difusa	52
Tabela 4 – Regras <i>Fuzzy</i>	55



# 1. INTRODUÇÃO

A energia é fundamental para o desenvolvimento económico e para o progresso da sociedade. A rápida industrialização, o crescimento de infraestruturas, o aumento da população e a economia em expansão enfatizam a necessidade de adquirir fontes adicionais de energia. No entanto, as reservas de energia convencionais são finitas e estarão disponíveis apenas por um período limitado e com preços cada vez maiores. O uso de combustíveis fósseis está ligado a problemas ambientais, principalmente o aquecimento global e às mudanças climáticas. O cenário energético atual oferece uma janela de oportunidade para as fontes de energia renovável, para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, expandindo e diversificando o *mix* de fornecimento de energia e deslocando a parte do desenvolvimento para a sustentabilidade, bem como a

responsabilidade ambiental e social. Para atingir esse objetivo, é essencial o aprofundar do desenvolvimento de tecnologias das energias renováveis.

As tecnologias renováveis são consideradas fontes limpas de energia. O uso otimizado desses recursos minimiza os impactos ambientais; produz resíduos secundários mínimos e são sustentáveis com base nas futuras necessidades económicas e sociais. O desenvolvimento sustentável requiere métodos e ferramentas para medir e comparar as atividades humanas e o seu impacto ambiental para vários produtos. As fontes de energia renovável (RES), que incluem biomassa, energia hidroelétrica, geotérmica, solar, eólica e das ondas, fornecem 14% da procura total de energia do mundo. Os recursos renováveis referem-se a recursos primários, domésticos e recursos energéticos limpos ou inesgotáveis [1].

Os recursos energéticos renováveis podem contribuir decisivamente para o desenvolvimento económico, social e sustentável das regiões rurais dos países em desenvolvimento. O consumo de combustíveis fósseis está a aumentar drasticamente, juntamente com a melhoria da qualidade de vida, a industrialização das nações em desenvolvimento e o aumento da população mundial. Há bastante tempo reconhece-se que o consumo excessivo de combustíveis fósseis leva, não apenas a uma diminuição mais rápida dos desses recursos, mas também a efeitos adversos no ambiente. Esses impactos resultam no aumento dos riscos para a saúde e na ameaça para as mudanças climáticas globais. Mudanças para melhorar as condições ambientais estão a ser implementadas politicamente, estando a sociedade a caminhar lentamente para a procura de métodos de produção mais sustentáveis, minimização de resíduos, redução da poluição do ar pelos transportes, geração de energia distribuída, conservação das florestas nativas e redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE).

O atual aumento da procura de energia vez soar o alarme para uma eventual crise energética. Tendo gerado um ressurgimento do interesse em promover alternativas renováveis para atender às crescentes necessidades energéticas do mundo em desenvolvimento.

A recente guerra que opõem a Rússia à Ucrânia está a acelerar uma rápida mudança e um investimento exponencial nas energias renováveis.

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia solar é o maior recurso energético de que a humanidade dispõe, seja para influenciar o clima, seja como fonte de calor e luz para os diversos ecossistemas e atividade humana.

No período anterior à Revolução Industrial, o homem disponha de poucas fontes de energia, tendo o sol sempre ao seu dispor. As necessidades energéticas eram limitadas, as pessoas deslocavam-se a pé ou utilizando animais; as maiores distâncias eram percorridas por barco à vela, estando nestes casos limitadas às localidades costeiras.

A mecanização existente recorria à ação do vento ou da água, para movimentar moinhos, ou rodas de água. A produção era essencialmente artesanal. Com a descoberta da máquina a vapor, nos finais do século XVIII, existiu uma revolução dos transportes e da indústria, essa fonte de energia estava mais disponível, traduzindo mais autonomia e produção.

A procura crescente de energia para alimentar as novas invenções, originaram a descoberta de fontes de energia focadas no petróleo e na eletricidade, permitindo o progresso até aos dias de hoje. Contudo o progresso foi baseado à custa do crescente aumento da poluição, principalmente a poluição atmosférica, graça à utilização massiva de combustíveis fósseis.

O protocolo de Quioto (KP) foi o primeiro tratado jurídico internacional, que explicitamente pretende limitar as emissões quantificadas de gases com efeito de estufa (GEE) dos países desenvolvidos. O Protocolo de Quioto e a Convenção Quadro das Nações Unidas Sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC), herdaram princípios fundamentais de regime climático, em particular o princípio das responsabilidades comuns, mas diferenciadas.

Contudo, é com o acordo de Paris, em dezembro de 2015, pela primeira vez, todos os países do mundo concordaram em unir esforços para: Manter o aquecimento global abaixo dos 2°C e combater os efeitos das alterações climáticas.

Contudo, a libertação de GEE, como o dióxido de carbono, gerado pelas atividades humanas está a desequilibrar e a provocar um aumento descontrolado da temperatura. Estima-se que o planeta aqueceu cerca de 1°C acima dos níveis pré-industriais. Esse aquecimento deve-se na sua maioria a atividades como a queima de combustíveis fósseis, desflorestação e pecuária, que geram gases que agravam o efeito de estufa. Os cientistas afirmam que um aumento de 2°C acima do nível pré-industrial podem criar alterações climáticas, como o aumento da frequência e da intensidade de fenómenos meteorológicos extremos, como secas, ondas de calor, inundações, cheias e furacões. Portugal, devido às suas características geográficas é dos países europeus mais sensíveis às alterações climáticas.

O aumento da temperatura média da Terra é um exemplo das alterações climáticas. A temperatura da Terra é regulada pelo efeito de estufa, parte da radiação que a Terra recebe do Sol é refletida de volta para a atmosfera, sendo absorvida pelos gases com efeito de estufa, aquecendo a Terra, sendo um processo natural para manter a vida.

Para limitar o aumento e prevenir os impactos das alterações climáticas, existem atualmente duas linhas de atuação: reduzir os GEE na atmosfera, reduzindo emissões e aumentando o sequestro do carbono (mitigação) e adaptar o país às mudanças previsíveis para minimizar os efeitos negativos das alterações climáticas nos ecossistemas e na qualidade de vida da população (adaptação).

A principal meta nacional neste quadro é o compromisso da neutralidade carbónica até 2050, ou seja, tornando o balanço entre as emissões e as remoções de carbono e outros GEE da atmosfera, de forma a contribuir para limitar o aquecimento global a 1.5°C em relação ao período pré-industrial.

O compromisso da União Europeia (UE) é a redução das emissões em pelo menos 55% até 2030 e em 2050 alcançar a neutralidade carbónica. Em 2021, na conferência das Nações

Unidas para as alterações climáticas (COP26), o presidente da conferência, Charles Michel, declarou: “A humanidade esteve em guerra com a natureza. É hora de fazer o planeta Terra a nossa única casa”.

A energia é fundamental para o desenvolvimento económico. Sendo a energia elétrica essencial na maioria dos processos de produção, as questões energéticas assumem particular relevância quando se analisa a sustentabilidade das sociedades industrializadas [2].

Tendo em conta o cenário mundial atual, no que diz respeito à produção elétrica, as energias renováveis representam um papel cada vez mais importante, atendendo aos objetivos ambientais definidos e acordados. Assim sendo, a percentagem de renováveis no *mix* energético será cada vez maior. Contudo, devido à flutuação das fontes de energia renovável, existem alguns condicionalismos na sua utilização, nomeadamente o seu armazenamento, armazenando energia produzida em excesso e interligando-a na rede quando é necessária, tornando a rede de distribuição de energia mais fiável e com melhor qualidade de energia. Será esse o grande desafio das energias renováveis, a sua natureza variável.

## 1.2. OBJETIVOS

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho consiste no estudo da incorporação das energias renováveis, fotovoltaica e eólica na geração de energia elétrica em geral. O uso de fontes de energia renováveis é essencial para a redução das emissões de gases com efeito de estufa e da dependência energética assente em combustíveis fósseis.

Assim, pretende-se nesta dissertação aplicar a lógica *fuzzy* na melhoria da eficiência energética num sistema híbrido de geração de energia elétrica. Os subsistemas a considerar são as tecnologias baseadas no aproveitamento da energia eólica e fotovoltaica.

Para a validação do sistema será usado o *software* Matlab e aplicado o Simulink para simulação.

### 1.3. CALENDARIZAÇÃO

A presente dissertação teve a calendarização apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Calendarização do projeto

	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.
Escolha do tema									
Pesquisa sobre energias renováveis									
Aprofundamento da Lógica Difusa									
Aprofundamento do Matlab e Simulink									
Desenvolvimento do sistema									
Relatório									

### 1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

No Capítulo 1, será efetuada uma contextualização sobre a produção e consumo de energia e o seu impacto sobre as alterações climáticas. No capítulo 2, serão abordadas as energias renováveis e a sua influência na produção total de energia. No capítulo 3, serão apresentados os recursos renováveis, com ênfase no solar e no vento. No capítulo 4, é apresentada a lógica difusa. No capítulo 5, é apresentada a modelação do sistema proposto. Por último, no capítulo 6, serão apresentadas as conclusões.

## 2. PRODUÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA E EÓLICA

### 2.1 ESTADO DA ARTE

Os recursos de energia não se encontram distribuídos uniformemente pelo globo, no entanto, os recursos renováveis estão mais equitativamente distribuídos e são de mais fácil acesso comparativamente aos recursos de origem fóssil e nuclear. Dentro das tecnologias renováveis não hídricas, espera-se que até 2035, os sistemas eólicos e fotovoltaicos sejam os que mais capacidade tragam aos sistemas elétricos [3].

Este é o momento ideal para a instalação de energias renováveis solares e eólicas em telhados, terrenos, fachadas e em tantos outros lugares que careçam de abastecimento de

energia, devido ao aumento crescente dos preços da energia, da conjuntura de guerra e de dificuldade no acesso a recursos energéticos e ao aumento crescente das necessidades energéticas, contudo é importante fazer a escolha certa de todos os componentes do sistema, a fim de garantir mais eficiência, segurança e durabilidade do sistema.

A utilização de microinversores para a otimização do sistema fotovoltaico é ideal em projetos residenciais ligados à rede elétrica, uma vez que traz segurança e melhor *payback* a longo prazo. A principal função dos inversores é converter a energia produzida pelas placas solares fotovoltaicas de Corrente Contínua (CC) para Corrente Alternada (CA), usada em casa. Assim, o sistema pode injetar energia elétrica apropriada na rede local e trabalhar de forma integrada, fornecendo condições para a utilização dos equipamentos elétricos.

Podemos dizer que o microinversor faz um tratamento individualizado de energia enquanto o inversor mais convencional (*string*) faz um tratamento em série ou em conjunto. O problema de operar com grandes conjuntos de painéis, é que se houver perda de geração de energia num deles – por qualquer fator, como sombreamento ou alguma fissura –, todo o sistema será afetado e entregará menos energia. O microinversor minimiza isso, já que se apenas um painel apresentar problemas, não afetará os outros, uma vez que cada painel é gerido individualmente. Outros fatores, que têm feito os microinversores ganharem espaço no mercado de energia solar, são a durabilidade e a garantia: esses aparelhos costumam ter 10 a 15 anos de garantia e de 25 a 30 anos de vida útil (similar à do painel solar). Já o inversor tradicional *string*, geralmente possui de 5 a 7 anos de garantia, dependendo do fabricante, e a sua vida útil fica entre 10 e 15 anos. Os microinversores também são mais seguros, já que operam em baixas tensões de corrente contínua (até 60 V) enquanto os inversores *string* utilizam tensões mais altas (de até 1.500 V). Pelo fato de operar com tensões elevadas na entrada, os inversores *string* também necessitam de uma caixa de proteção externa obrigatória para segurança. Esse componente não é necessário no caso dos microinversores, pois operam com tensões extremamente baixas e possuem essa proteção embutida no equipamento, que converte a energia contínua em energia alternada.

A tecnologia *Maximum Power point tracking* (MPPT) encontra as melhores condições na relação entre a corrente e a tensão para que o sistema possa gerir energia de forma mais

eficiente. Num sistema com microinversores, a gestão do MPPT é efetuada de forma individualizada, enquanto os inversores *string* observam o conjunto das placas. Cada módulo receberá um tratamento diferenciado para otimizar a sua energia, e o sombreamento de um deles terá um impacto restrito e muito menor no sistema como um todo. O tratamento individualizado de cada módulo solar, uma das principais características dos microinversores, facilita bastante a monitorização e a manutenção dos sistemas. Isso acaba por beneficiar a produção total de forma significativa. Com os inversores *string*, precisamos que as diferentes placas conectadas estejam direcionadas na mesma orientação, para produzir a tensão idêntica ou similar. Não podemos, por exemplo, utilizar o mesmo inversor para painéis que estejam voltados para lados opostos ou com inclinação diferente.

A eficiência energética está a ser melhorada com novas células solares orgânicas, nomeadamente nas suas propriedades, leves e flexíveis. Este desenvolvimento que vai levar a um grande impulso na melhoria da conversão da luz solar em energia, fazendo com que estas comecem a ser mais comercializadas. Novos métodos permitem que painéis solares produzam mais energia do que o habitual, uma técnica que passa pelo uso de cristais ferroelétricos, em vez de silício. Atualmente, a maioria dos painéis solares são produzidos com recurso a silício, pois este tem um custo baixo, porém a eficiência geral deste material levou a que investigadores fizessem experiências com novos materiais, como os cristais de ferro elétricos. Sendo que estes cristais ferro elétricos têm um grande benefício, não requerem uma junção PN. Também estão a ser desenvolvido painéis solares que produzem energia sem luz solar, o AuREUS para funcionar recorrendo a partículas luminescentes de resíduos de fruta e vegetais que absorvem a luz solar ultravioleta. Depois convertem a luz ultravioleta em luz visível, sendo depois transformada em energia, através de uma película solar.

Pela primeira vez, os investigadores desenvolveram uma célula solar que ultrapassou a barreira dos 30% de eficiência. A equipa de investigadores de várias universidades e institutos na Holanda, alcançou este objetivo ao combinar células solares de silício com perovskita. A perovskita foi aclamada pelas suas propriedades e pelo papel que poderia desempenhar no avanço da tecnologia solar, com alguns a falarem de um “material

milagroso”. Tradicionalmente, as células solares baseadas em silício oferecem uma eficiência de cerca de 22%.

A turbina eólica sem hélices Vortex Bladeless revoluciona o mercado e será uma alternativa de menores custos, de menor manutenção e também mais silenciosa do que os aerogeradores eólicos tradicionais.

As inovadoras mini-turbinas eólicas projetadas para telhados são desenvolvidas para se encaixarem perfeitamente no topo de telhados, são produzidas pela The Power Collective podendo passar quase despercebidas, mas na verdade o equipamento aproveita de forma simples e eficiente a energia dos ventos para produzir eletricidade.

A superfície inclinada nos telhados é aproveitada pela estrutura da RidgeBlade para direcionar e concentrar o vento predominante. Depois de percorrer a superfície do telhado forma um ponto de compressão na crista do mesmo, acelerando o fluxo de ar através da turbina. Como resultado, a velocidade do vento medida ao redor do cume do telhado pode chegar a ser mais de três vezes a velocidade real do vento ambiente, o que otimiza a produção de energia elétrica.



Figura 1 - Turbina eólica RidgeBlade [4].

## 2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar está associada à radiação do sol capaz de produzir calor, provocar reações químicas ou gerar eletricidade. A quantidade total de energia solar incidente na Terra excede em muito as atuais e previstas necessidades energéticas mundiais. Se aproveitada adequadamente, essa fonte de energia tem o potencial de satisfazer todas as necessidades

futuras de energia. No século XXI, espera-se que a energia solar se torne cada vez mais atrativa como fonte de energia renovável, devido às suas características, inesgotável e não poluente, em forte contraste com os finitos combustíveis fósseis como o carvão, petróleo e gás natural. Assim, a energia do sol é convertida em energia térmica ou elétrica. A energia solar é a fonte de energia renovável mais limpa e abundante disponível, sendo um muito importante recurso a nível nacional. As tecnologias energéticas solares podem aproveitar essa energia para uma variedade de usos, incluindo geração de eletricidade ou aquecimento de água para uso doméstico, comercial ou industrial.

Muitos estão familiarizados com as chamadas células fotovoltaicas, ou painéis solares, existentes em naves espaciais, telhados e calculadoras portáteis. As células são feitas de materiais semicondutores. Quando a luz solar atinge as células, são libertados eletrões dos seus átomos. À medida que os eletrões fluem através da célula, geram eletricidade. Noutra forma de utilização, as instalações termoelétricas empregam várias técnicas para concentrar a energia do sol como fonte de calor. O calor é então usado para ferver a água para acionar uma turbina a vapor, a qual gera eletricidade da mesma maneira que as centrais termoelétricas com combustíveis fósseis e nucleares, fornecendo eletricidade.



Figura 2 – Central Fotovoltaica [5].

Deste modo, faz-se a conversão direta da radiação solar em eletricidade. Tal facto deve-se ao efeito fotovoltaico, que corresponde ao aparecimento de uma diferença de potencial

nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, a qual se deve à absorção da luz.

As instalações fotovoltaicas podem ser montadas no chão, no telhado, nas paredes, em estruturas específicas fixas ou mesmo flutuando em superfícies aquáticas. A montagem pode ainda passar por um rastreador solar para acompanhar o movimento do sol. Assim, os sistemas fotovoltaicos variam de pequenos sistemas montados no telhado ou integrados em edifícios, com capacidades que variam de algumas dezenas a várias dezenas de quilowatts, por vezes para autoconsumo, a grandes centrais de centenas de megawatts em escala de utilidade pública e produção centralizada de energia para a rede.

Podem também existir coletores solares fotovoltaicos térmicos híbridos que convertem a radiação solar simultaneamente em energia térmica e elétrica. Existem também sistemas concentradores fotovoltaicos que usam lentes e espelhos para focalizar a luz do sol em pequenas células solares, alcançando-se desta forma uma potência fotovoltaica superior.

## 2.3 ENERGIA EÓLICA

Energia eólica designa a energia cinética do vento, a qual constitui uma forma de energia renovável que tem sido convertida em energia mecânica (moinhos de vento) e elétrica. A conversão em eletricidade faz-se mediante tecnologias das quais a mais amplamente difundida é a turbina eólica de eixo horizontal associada a um gerador. Quanto maiores a dimensão da turbina e a intensidade do vento, mais eletricidade é produzida. Duplicar o diâmetro de rotação das pás de uma turbina de eixo horizontal aumenta quatro vezes a quantidade de energia elétrica gerada.

A energia eólica pode ser explorada em terra (eólica *onshore*) ou no mar, ao largo (eólica *offshore*). Pode também ser explorada mediante centrais constituídas por grupos de turbinas de grandes dimensões a operar como uma só unidade, os parques eólicos, que produzem eletricidade para injeção na rede pública de distribuição ou, de forma descentralizada, através de turbinas relativamente pequenas, desligadas da rede.

Os parques eólicos em terra são constituídos por turbinas com diâmetro de rotação superior a 10 m. Atualmente este diâmetro chega a 170 m, em turbinas com potência de 7 MW cada. O funcionamento destas turbinas é interrompido quando o vento é demasiado fraco (3 m/s) ou forte (25 m/s). Mesmo que uma turbina pare, a produção do parque é mantida pela eletricidade gerada noutras turbinas, onde a intensidade do vento se mantém adequada.

O conhecimento aprofundado dos regimes de vento numa dada região é importante para otimizar o seu aproveitamento nas turbinas e a integração da eletricidade no sistema energético.

A energia eólica explorada através de parques eólicos em terra, constitui uma das principais fontes de eletricidade renovável no sistema elétrico nacional, apenas ultrapassada pela hídrica em anos de abundante pluviosidade. A produção de eletricidade com origem eólica distribui-se por todo o país, ocorrendo principalmente nos distritos de Castelo Branco, Coimbra, Faro, Guarda, Leiria, Lisboa, Viana do Castelo, Vila Real e Viseu.

Como os locais mais adequados para o aproveitamento de recurso eólico já se encontram ocupados com centrais, a potência instalada encontra-se relativamente estabilizada desde 2017, totalizando cerca de 5600 MW em 2022. Esta estabilização constitui um dos desafios ao necessário aumento de eletricidade renovável, afigurando-se como uma medida mitigadora a substituição total ou parcial do equipamento instalado por outro mais recente, de preferência com capacidade de armazenamento e maior produção de eletricidade.

Turbinas eólicas de reduzida dimensão, com potência entre 0,5 e 100 kW e eixo horizontal ou vertical, destinam-se à injeção de eletricidade numa casa, numa pequena aplicação industrial com difícil acesso à rede pública, ou na rede elétrica específica de uma comunidade.

Portugal conta com produção descentralizada de energia eólica por via das Unidades de Produção para Autoconsumo (UPAC), Unidades de Pequena Produção (UPP) e Mini/Micro centrais, totalizando uma potência instalada na ordem de 4 MW em 2022.

A Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) tem em consideração o papel importante da energia eólica nas suas atividades de modelação energética prospetiva, Figura 3.



Figura 3 - Parque Eólico [6].

## 2.4 IMPORTÂNCIA DA ENERGIA SOLAR E EÓLICA NO NOSSO CONSUMO

Entre janeiro e setembro de 2022, foram gerados **31 225 GWh** de eletricidade em Portugal Continental, dos quais **54,5 % foram de origem renovável**, como mostrado nas Figuras 4 e 5.

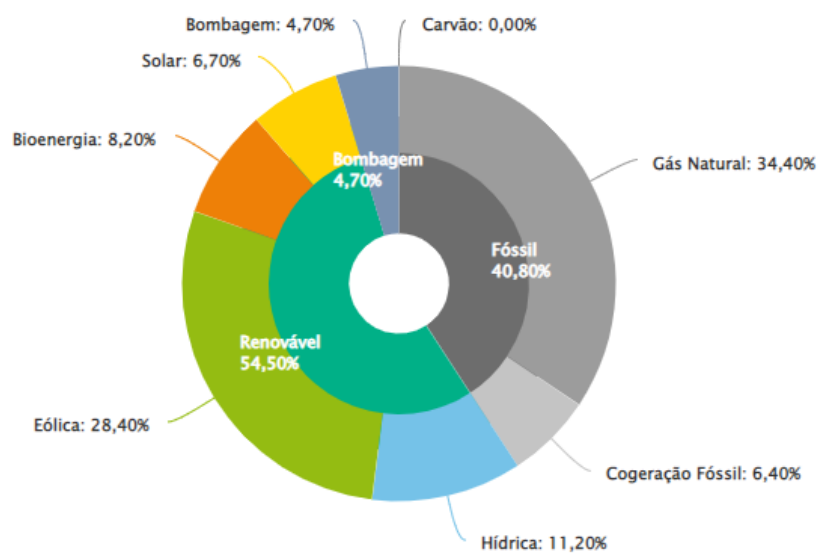


Figura 4 – Fontes de energia [7].

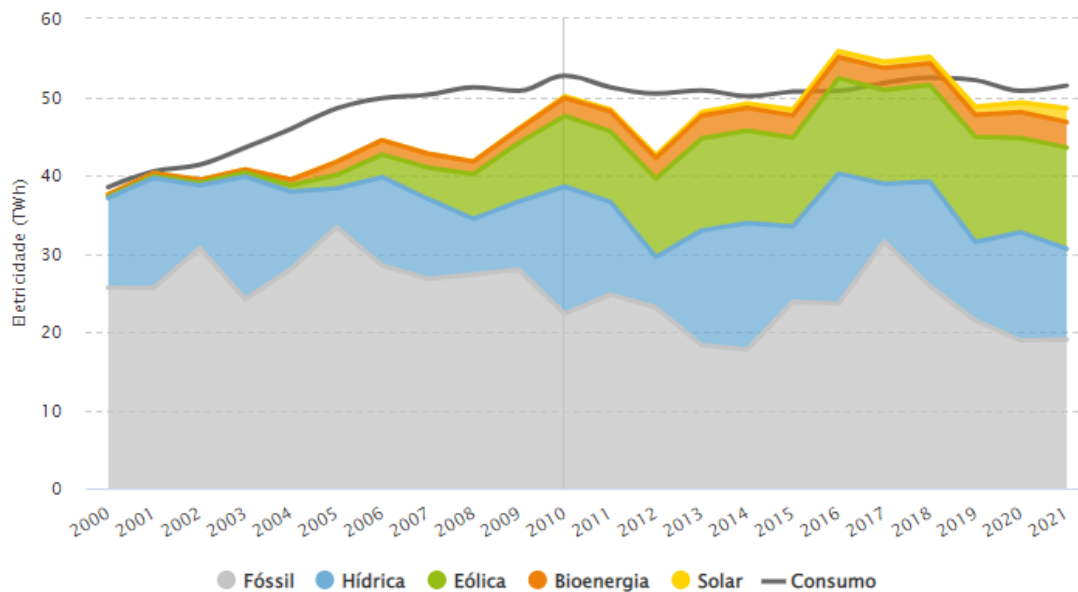


Figura 5 – Consumo e produção por fonte de energia [8].

A maior utilização dos recursos endógenos e renováveis portugueses para a produção de eletricidade, tem alterado a composição do *mix* de produção de eletricidade em Portugal e tem, consecutivamente, desempenhado um papel cada vez mais determinante na satisfação do consumo, tendo sido bastante evidente em 2020 devido à queda no consumo resultante da pandemia da COVID-19.

A produção fotovoltaica em Portugal beneficiou de um regime mais favorável em agosto e ultrapassou a média histórica. De acordo com os dados divulgados pela Redes Energéticas Nacionais (REN) o índice de produtividade solar foi de 1,1. A média histórica é igual a 1. “Este aumento de produtividade, conjugado com as novas instalações que vão sendo ligadas à rede, permitiu atingir uma nova ponta máxima de cerca de 1.260 MW, segundo a REN.

Nos últimos anos as eólicas têm gerado aproximadamente um quarto da eletricidade consumida em Portugal. Em 2020 a energia eólica abasteceu 25% do consumo, depois de em 2019 ter contribuído com cerca de 26%. É a maior fonte de eletricidade renovável. O contributo da eólica cresceu bastante ao longo dos últimos 15 anos, mas esse crescimento praticamente parou nos anos mais recentes, já que a maior parte dos locais com melhor recurso eólico já estão ocupados e a atenção dos investidores tem-se virado para outros

ativos com elevado potencial de negócio, como as centrais solares. Portugal é o nono país da União Europeia com mais capacidade eólica instalada (cerca de 5,5 GW), atrás da Alemanha (líder, com 62,6 GW), Espanha (27,3 GW), França (17,9 GW) e ainda Itália, Suécia, Holanda, Polónia e Dinamarca, segundo os dados da associação europeia das empresas eólicas, a Wind Europe. Mas em termos de contributo da eólica para a produção de eletricidade, Portugal ocupa a quarta posição (25%), apenas atrás da Dinamarca (48%), Irlanda (38%) e Alemanha (27%). A média da União Europeia é de 15%. Os dados da Direção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) indicam que os quase 5,5 GW eólicos existentes em Portugal estão distribuídos por 263 parques eólicos, num total de 2779 aerogeradores, que em média estão a produzir energia 2355 horas por ano (ou seja, 27% do ano). A EDP Renováveis é o maior operador, com 1248 megawatts (MW) em funcionamento. O segundo maior produtor é a Finerge, também com mais de 1000 MW instalados. O terceiro operador é a Iberwind, com mais de 700 MW em operação, Figuras 6 e 7.

Em Portugal existirão algumas oportunidades de desenvolvimento futuro para esta fonte de energia. Uma passa pelo reequipamento dos parques existentes: à medida que as turbinas mais antigas chegam ao fim do seu ciclo de vida poderão ser substituídas por outras mais modernas e potentes; o que permitirá (mantendo a potência de ligação à rede de um dado parque) diminuir o número de torres eólicas no território. Uma outra oportunidade de negócio para as eólicas poderá ser o mar: as eólicas *offshore* em Portugal estão ainda em fase embrionária, com apenas um parque do consórcio Windplus a funcionar em fase pré-comercial ao largo de Viana do Castelo. O facto de a costa portuguesa apresentar um acentuado declive torna inviável desenvolver no “*offshore*” português parques com soluções de fixação mais baratas e massificadas (como as usadas em águas pouco profundas nos mares do Norte da Europa), obrigando a recorrer a tecnologias de eólicas flutuantes, que, não estando totalmente maduras, ainda apresentam custos pouco competitivos face a outras fontes de energias renováveis.

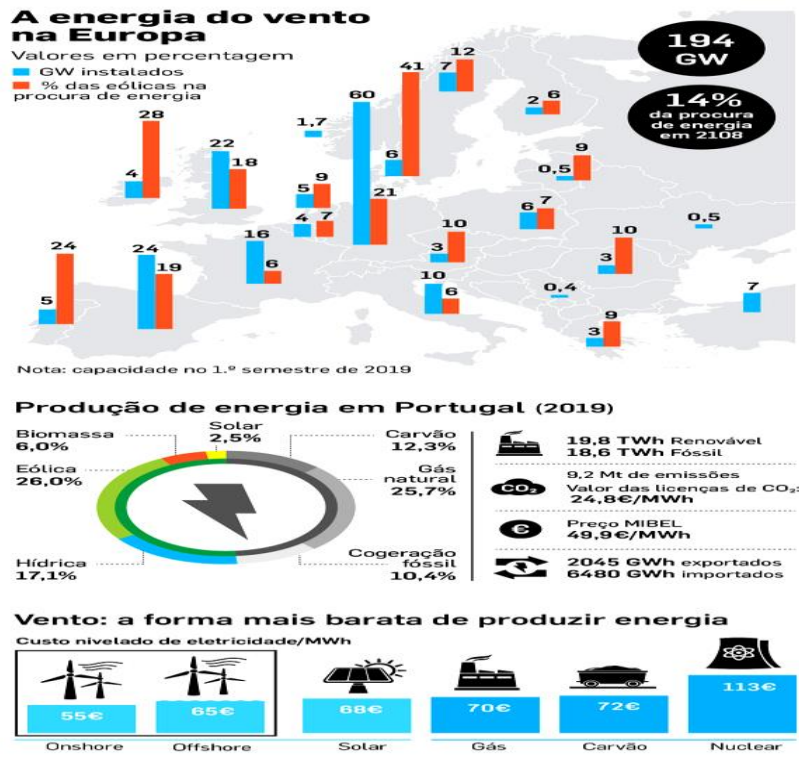


Figura 6 – A energia do vento [9].

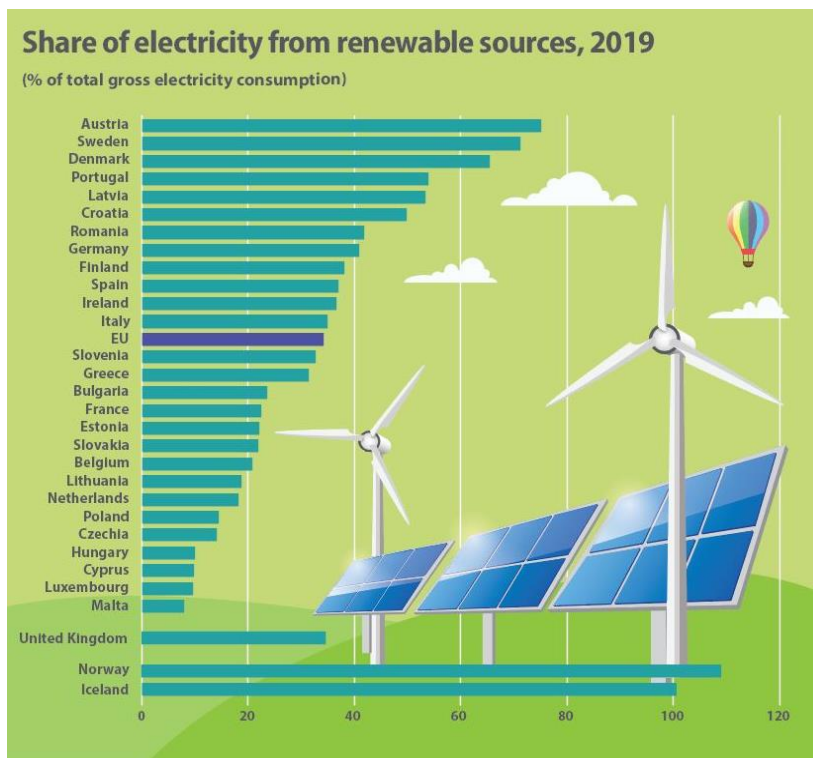


Figura 7 – Percentagem de energia renovável [10].

## 2.5 VARIAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA

A maioria das fontes de geração de energia elétrica do país não apresentam variação substancial na potência ao longo do dia, exceto as gerações fotovoltaica e eólica. Nestas duas há diferenças substanciais entre o máximo e mínimo de geração durante o dia e entre os dias, em função da energia disponível pelo sol e vento, respetivamente.

Para a energia solar fotovoltaica essa variação é óbvia, pois há incidência de radiação solar apenas durante o fotoperíodo, aumentando entre o nascer do sol e o meio-dia astronómico do local onde está instalado o equipamento, e redução até o pôr do sol.

A geração de energia eólica, por sua vez, depende da velocidade do vento, uma vez que os equipamentos dispõem de dispositivos para se posicionarem perpendicularmente à direção deste, visando o melhor aproveitamento de sua energia. Assim, se considerarmos cada fonte individualmente, a variação no potencial de geração ao longo do dia não atende à variação das necessidades de carga do Sistema Elétrico Nacional (SEN). Desde que ajustada a proporção de geração por cada uma delas, estas fontes complementaríam com segurança a geração pelas fontes que não apresentam variação significativa ao longo do dia, em função de sua ampla distribuição no território nacional, contemplando as variações locais e regionais de disponibilidade de radiação solar e de vento, que são as fontes de energia para esses sistemas.

A maior utilização dos recursos endógenos e renováveis portugueses para a produção de eletricidade tem alterado a composição do *mix* de produção de eletricidade em Portugal, Figura 8, e tem, consecutivamente, desempenhado um papel cada vez mais determinante na satisfação do consumo, tendo sido bastante evidente em 2020 devido à queda no consumo resultante da pandemia da COVID-19.

Verifica-se que no Norte, por um lado, o potencial energético do recurso eólico durante o dia é ligeiramente inferior ao que se verifica durante a noite e, por outro, o potencial durante o verão é significativamente inferior ao verificado no Inverno. Verifica-se que o recurso eólico está em contraciclo assinalável com o recurso solar, disponível apenas durante o dia e com maior intensidade no verão.

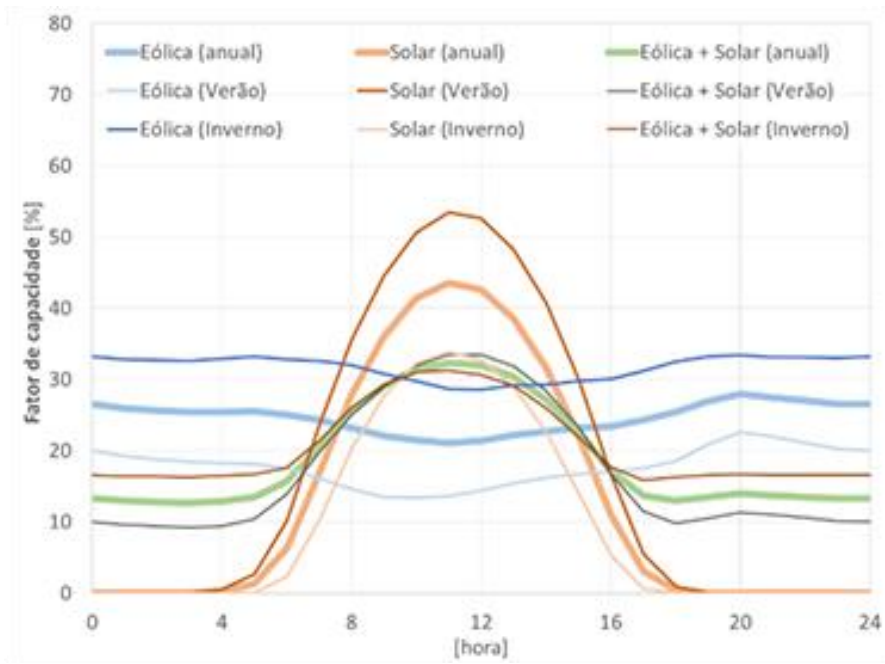


Figura 8 – Fator de capacidade Solar e Eólica [11].



# 3. RECURSOS RENOVÁVEIS E TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO

## 3.1 ENERGIA SOLAR

A Energia irradiada pelo sol num segundo é muito maior que a energia consumida pela humanidade desde o seu aparecimento na face da Terra, até os dias de hoje. Grande parte dessa energia, claro, não chega até a Terra.

A energia solar é produzida pelas reações nucleares que acontecem no interior do sol a grandes profundidades. Nessas reações os átomos de hidrogênio combinam-se formando

átomos de hélio, libertando energia. Esta energia viaja do interior do sol até à sua superfície, chamada de fotosfera e daí irradia-se em todas as direções.

Essa energia irradiada chega à Terra vinda do espaço através das partículas de energia chamadas fotões. Os fotões deslocam-se a uma velocidade de 300.000 km/s, por isso demoram cerca de 8 minutos para chegar à Terra, que está a aproximadamente 150 milhões de quilômetros do sol.

A radiação solar é uma radiação eletromagnética que tem distribuição espectral conforme a figura abaixo, Figura 9:

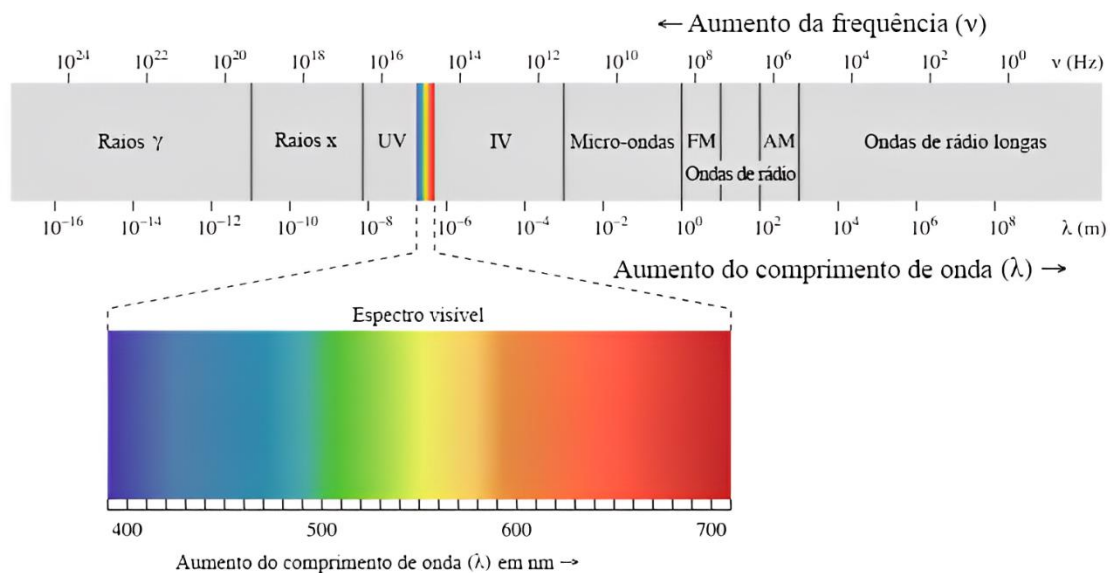


Figura 9 – Espectro da radiação eletromagnética [12].

A energia resultante desta reação é irradiada para o espaço, parte dela atinge a atmosfera terrestre com uma intensidade de cerca de 1.373 W/m<sup>2</sup>. Uma vez que parte da energia inicial é refletida ou absorvida pela atmosfera, num dia de céu claro é possível medir junto à superfície terrestre num plano perpendicular, cerca de 1.000 W/m<sup>2</sup>.

Esta radiação que alcança a superfície terrestre divide-se em três componentes, direta, a que vem "diretamente" desde o sol, a difusa proveniente de todo o céu exceto do sol, das nuvens, gotas de água, e a radiação refletida que provém da reflexão do solo, Figura 10.

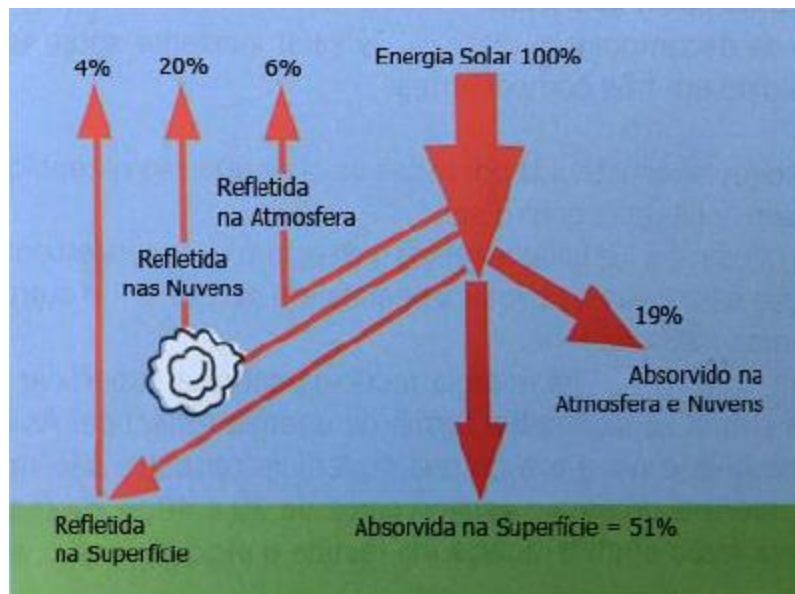


Figura 10 – Radiação solar [13].

A energia solar advém da radiação solar direta, que pode ser aproveitada de diversas formas, permitindo o seu uso em aplicações térmicas em geral, obtenção de força motriz diversa, obtenção de eletricidade e de energia química.

A conversão da energia solar pode ser feita de duas maneiras, de forma ativa e de forma passiva. A forma ativa, que é a transformação dos raios solares noutras formas de energia, nomeadamente a térmica ou a elétrica, e a forma passiva que se baseia no aproveitamento da energia para aquecimento de edifícios ou prédios através de opções arquitetónicas e de orientação solar.

Existem dois tipos de energia solar ativa:

- . **Energia solar fotovoltaica** – graças a um efeito físico, a radiação do sol pode gerar uma corrente elétrica. É, portanto, uma forma de converter esse recurso em eletricidade.
- . **Energia solar térmica** – este sistema aproveita a capacidade de calor do sol. A radiação solar é convertida em energia térmica para aquecer um fluido, que pode ser usado para aquecimento de água sanitária. Nos sistemas térmicos solares é gerado vapor e posteriormente eletricidade.

## 3.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Um sistema fotovoltaico é uma fonte de potência elétrica, na qual as células fotovoltaicas transformam a radiação solar diretamente em energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser implantados em qualquer localidade que tenha radiação solar suficiente. Estes sistemas não utilizam combustíveis, não possuem partes móveis e requerem pouca manutenção. Durante o seu funcionamento não produzem ruído acústico ou eletromagnético, nem emitem gases tóxicos ou outro tipo de poluição ambiental. A adaptabilidade dos sistemas fotovoltaicos é tão alta, que são utilizados em locais inóspitos como: espaço, desertos, selvas, regiões remotas, etc.

Os sistemas fotovoltaicos são classificados de acordo com a forma como é feita a geração ou entrega da energia elétrica, Figura 11, nomeadamente em:

- Sistemas Isolados;
- Sistemas ligados à rede (*OnGrid*).

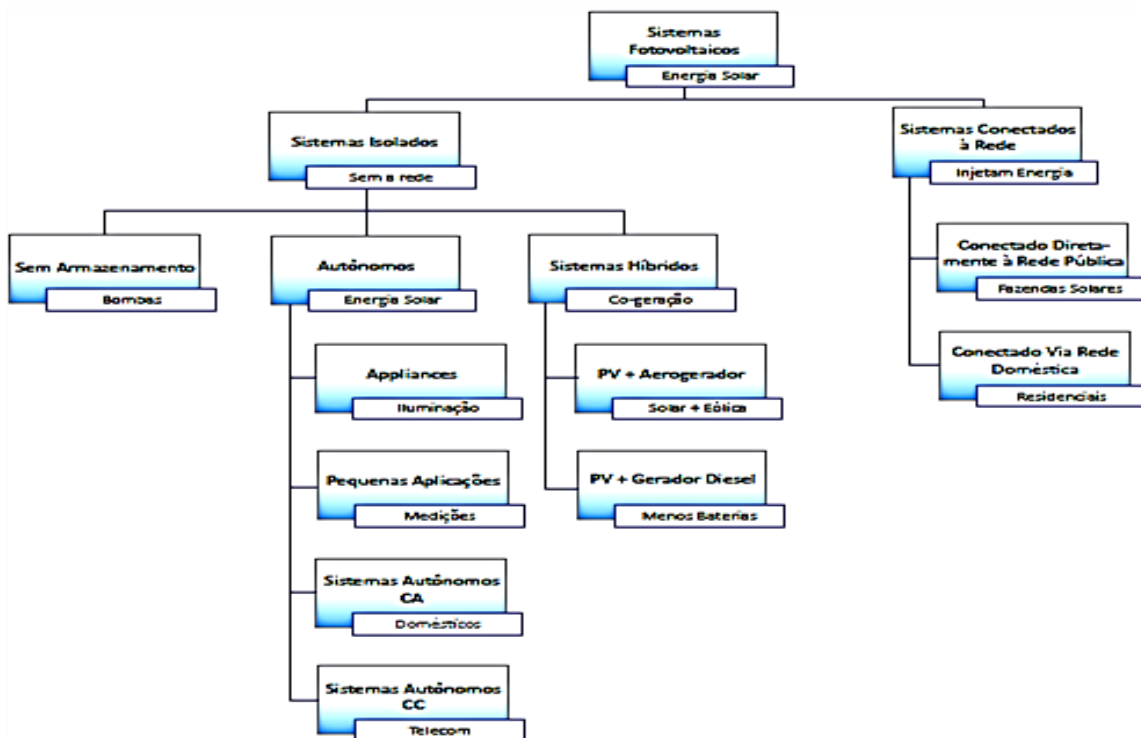


Figura 11 – Sistemas fotovoltaicos [14].

### 3.2.1 SISTEMAS ISOLADOS

Um sistema fotovoltaico isolado é aquele que não tem contacto com a rede de distribuição de eletricidade das concessionárias. Os sistemas isolados podem ser classificados em Híbridos ou Autónomos (Puros). Os sistemas autónomos podem ser com, ou sem armazenamento elétrico.

### 3.2.2 SISTEMAS HÍBRIDOS

Um sistema fotovoltaico híbrido trabalha em conjunto com outro sistema de geração elétrica, que pode ser um aerogerador (no caso de um sistema híbrido solar-eólico), um moto-gerador a combustível líquido (ex.: diesel), ou qualquer outro sistema de geração elétrica. Um sistema híbrido pode ou não possuir sistema de armazenamento de energia. Quando possui, geralmente o sistema de armazenamento tem autonomia menor ou igual a um dia.

### 3.2.3 SISTEMAS AUTÓNOMOS

Um sistema fotovoltaico puro é aquele que não possui outra forma de geração de eletricidade. Devido ao facto de o sistema só gerar eletricidade nas horas de sol, os sistemas autónomos são dotados de acumuladores que armazenam a energia para os períodos sem sol, o que acontece todas as noites, e também nos períodos chuvosos ou nublados. Os acumuladores são dimensionados de acordo com a autonomia que o sistema deve ter, e essa varia de acordo as condições climáticas onde será implantado o sistema fotovoltaico.

### 3.2.3.1 SISTEMAS AUTÓNOMOS SEM ARMAZENAMENTO

Os sistemas autónomos sem armazenamento, são sistemas que funcionam somente durante as horas de sol. Temos como exemplo os sistemas de bombagem de água. As características das bombas são calculadas levando em consideração a necessidade de água e o potencial solar da localidade. O painel fotovoltaico é dimensionado para fornecer a potência para a bomba. Apesar de, geralmente, não utilizarem sistemas de armazenamento elétrico, o armazenamento energético é feito na forma de água num reservatório.

#### 3.2.3.1.1 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO

Um sistema fotovoltaico residencial autónomo, geralmente, possui os seguintes componentes, Figura 12:

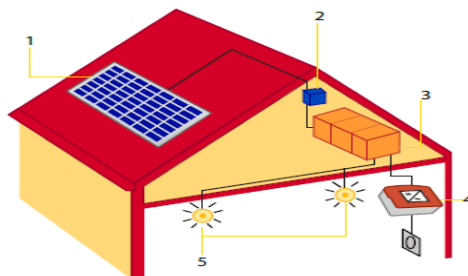


Figura 12 – Sistema residencial autónomo [15].

- 1 – Painel fotovoltaico;
- 2 – Controlador de Carga/Descarga das baterias;
- 3 – Banco de baterias;
- 4 – Inversor autónomo, para cargas em CA;
- 5 – Cargas CC ou CA.

### 3.2.4 SISTEMAS LIGADOS À REDE (ONGRID)

Os sistemas fotovoltaicos ligados à rede fornecem energia para as redes de distribuição. Todo o potencial gerado é rapidamente escoado para a rede, que age como uma carga, absorvendo a energia. Os sistemas ligados à rede, também chamados de *OnGrid*, geralmente não utilizam sistemas de armazenamento de energia, e por isso são mais eficientes que os sistemas autônomos, além de, geralmente, serem mais baratos. Os sistemas *OnGrid* dependem de regulamentação e legislação favorável, pois usam a rede de distribuição das concessionárias para o escoamento da energia gerada, Figura 13.

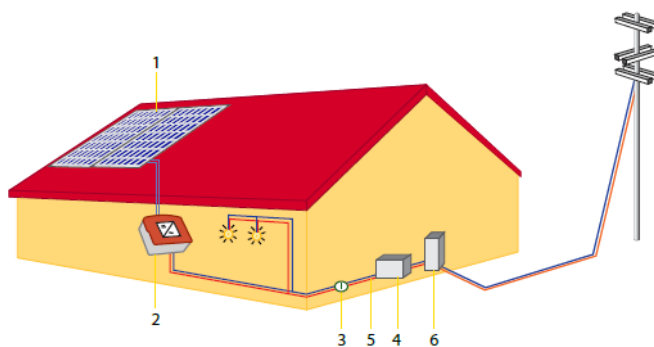


Figura 13 – Sistemas ligados à rede [16].

1 – Módulos Fotovoltaicos.

2 – Inversor *Grid-Tie* – Transforma a corrente contínua do painel em corrente alternada de 127 V/220 V e 60 Hz, compatível com a eletricidade da rede.

3 – Interruptor de Segurança.

4 – Quadro de Luz - distribui energia para a casa.

5 – A eletricidade alimenta os utensílios e eletrodomésticos.

6 – O excedente volta para a rede elétrica através do medidor fazendo-o rodar ao contrário, reduzindo a tarifa de energia elétrica.

### 3.3 ENERGIA EÓLICA

O vento tem origem nas diferenças de temperatura na Terra, as quais causam diferenças de pressão na atmosfera, levando ao deslocamento de massas de ar para se estabelecer o equilíbrio de pressão. A rotação da Terra também contribui para a velocidade e direção do vento, sendo a sua energia (cinética) caracterizada pela densidade da massa de ar e pela sua velocidade [17].

Baseado nos registos históricos, o domínio da energia do vento está associado ao desenvolvimento das antigas civilizações, quer através da construção de frotas navais destinadas ao comércio, ou com objetivos bélicos; quer através do desenvolvimento de moinhos de vento para moagem de cereais, ou ainda mecanismos de elevação de água, os quais desenvolveram a agricultura no antigo Egito e na China. Foi também o vento que incidia nas velas, a fonte de energia que levou as caravelas portuguesas a descobrirem novas terras e introduziram o comércio.

Em 1887, Charles Brush, um cientista norte-americano, construiu o que é considerada a primeira turbina eólica para produção de eletricidade. Dispositivo que constituiu uma autêntica inovação técnica, na medida em que utilizava a energia eólica para carregar baterias que instalou na própria casa, e que gerou eletricidade em autoconsumo durante 20 anos.

A força do vento é um fenómeno físico de deslocação de massas de ar, originada nos desequilíbrios permanentes de pressão e temperatura, e ainda influenciada pela própria rotação e orografia do planeta (que provoca aquecimentos irregulares da superfície). Entende-se o recurso eólico como:

- . **Renovável**, porque se regenera naturalmente sem intervenção do homem;
- . **Limpo**, porque é um recurso natural e o processo para a sua transformação não gera poluição;
- . **Disponível**, em qualquer local do planeta.

A escassez e o preço elevado dos combustíveis fósseis, aliada ao desenvolvimento de uma consciência mundial sobre a necessidade de adotar comportamentos ambientalmente responsáveis, levou à exploração dos recursos eólicos sob a forma de eletricidade.

**Para a captação do vento, as centrais de geração são tipicamente instaladas em locais caracterizados por:**

. Zona de orografia montanhosa (parque *onshore*),

. Zona marítima em que o vento tem velocidade mais constantes (parque *offshore*).

A transformação do recurso eólico é realizada em duas fases:

**Transformação da força do vento em energia cinética** – habitualmente, o vento é captado por sistema de hélice;

**Conversão da energia mecânica em energia elétrica** – a energia mecânica promovida pela rotação das hélices, é transmitida, através de um veio, a um gerador de energia elétrica, que produz eletricidade.

Num aerogerador a transformação da energia segue essas duas fases, podendo ser complementadas por técnicas de otimização de produção de energia elétrica, como por exemplo:

1. Pitch das pás, que orienta o ângulo das pás para oferecer mais ou menos resistência ao vento;
2. Acompanhamento do eixo horizontal da máquina com a direção perpendicular do vento;
3. Caixa de velocidades, que otimizam e/ou estabilizam a velocidade de gerador, etc.

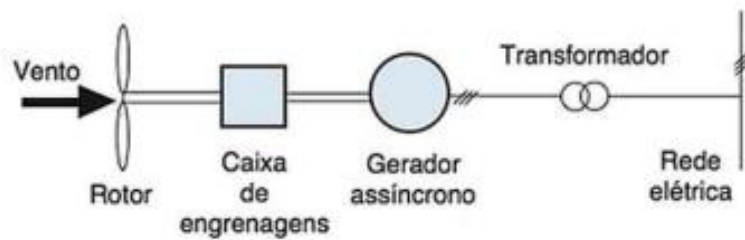


Figura 14 – Turbina eólica conectada à rede [18].

Designa-se aerogerador o equipamento destinado a gerar energia elétrica a partir da energia fornecida pelo vento. A energia cinética do vento movimenta a turbina, que produz energia mecânica, transmitindo-a ao gerador, que por sua vez faz a conversão de energia mecânica em elétrica, Figura 14.

### 3.3.1 OS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR

Os componentes de um aerogerador são a turbina, a torre, a nacelle, a caixa de engrenagens, o cubo, o gerador e as pás, Figura 15.

#### A torre

É a estrutura de suporte, podem ser tubulares cónicas ou treliçadas. Na fase inicial da energia eólica, as torres treliçadas foram as mais utilizadas, com o aumento do tamanho das turbinas, as torres tubulares de aço são as mais comumente utilizadas.

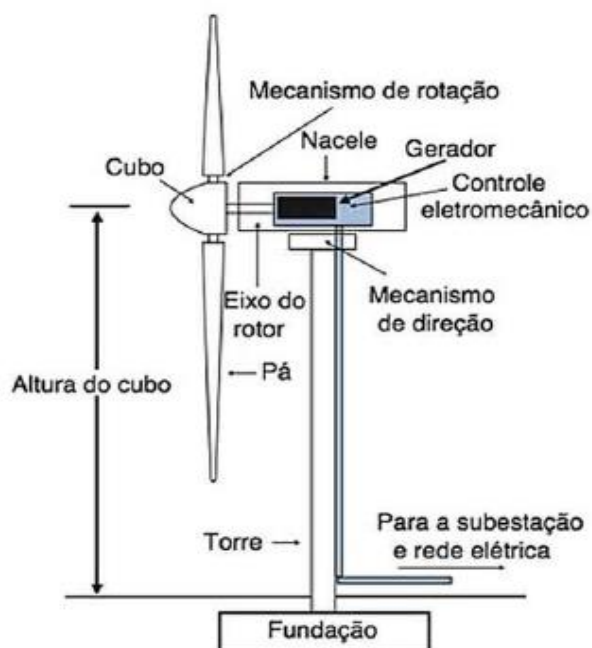


Figura 15 – Componentes de um aerogerador [19].

### A nacele

É a estrutura montada em cima da torre onde estão contidos o gerador e a caixa de acoplamento. O uso ou não de caixas de engrenagens e a disposição dos componentes na nacele são fatores para determinar o seu tamanho. Dentro da nacele há um sistema de direção que, através de um motor, é responsável por colocar a turbina na direção do vento. Está presente também um sistema de bloqueio, para efetuar a manutenção e paragens de emergência. Sob a nacele estão os medidores da velocidade do vento (anemómetro) e da sua direção (biruta, também conhecida por *windvane*), que transmitem os dados para o sistema de controlo.

### A caixa de engrenagens

Localizada dentro da nacele, a ideia da caixa de engrenagens é fazer a sintonia correta entre a baixa velocidade da turbina e a alta velocidade do gerador.

Os aerogeradores sem esse dispositivo multiplicador, constituído basicamente de engrenagens de transmissão e acoplamentos, são ditos mais sofisticados. Segue explicação para os dois casos.

**Aerogeradores com multiplicador** - nessa situação, obviamente se faz necessário que o tamanho da nacela seja maior, já que irá comportar um multiplicador (a caixa de engrenagens em si), composto de mancais e um eixo de transmissão e acoplamento. Uma das desvantagens do uso do multiplicador é o ruído produzido por ele, apesar de uma nacela bem isolada acusticamente poder diminuir tal ruído a valores aceitáveis para o meio externo. Outra desvantagem é a manutenção das engrenagens de transmissão. O seu tempo de vida útil é de aproximadamente 20 anos.

**Aerogeradores sem o multiplicador** - a solução para a baixa velocidade da turbina com a velocidade superior do gerador é a utilização de geradores multipólos de baixa rotação e grande porte, com o acoplamento direto na turbina. Ao reduzir-se o custo com a manutenção, operação e o número de peças mecânicas envolvidas, alcança-se uma opção viável, com um aerogerador sem multiplicador. Não haverá caixas de engrenagens, sistema hidráulico e acopladores, além de haver menor nível de ruído, o que são vantagens relevantes.

### **O cubo**

O cubo é a estrutura na qual são fixadas as pás, construída em aço ou liga metálica de alta resistência. O rotor é o conjunto do cubo e das pás da turbina eólica. Estes são muitas vezes considerados os componentes mais importantes da turbina.

### **A pá**

A pá é a estrutura que é movimentada pelo vento. As pás são construídas em fibra de vidro e reforçadas por epóxi e/ou madeira. Na fixação com o cubo, no caso das turbinas de controle de passo, a pá pode ter rolamentos. Pode atingir os 75 metros.

### **O gerador**

O gerador é a máquina responsável pela produção da energia elétrica propriamente dita. Há dois modelos usados pelos aerogeradores: utilizando máquinas síncronas ou assíncronas. Toda uma eletrónica de potência é envolvida no processo de conversão da frequência, já que é necessário controlar alguns parâmetros de saída da onda, como a sua frequência, amplitude e fator de potência. A energia entregue à rede tem de estar na frequência ajustada. O problema é que a frequência de geração varia com a rotação do gerador, que por sua vez varia com a rotação da turbina, que depende de uma variável aleatória: o vento. A solução é o uso de um retificador CA-CC e de um inversor CC-CA.

Para aumentar os níveis de produção, os aerogeradores são reunidos em parques de geração de energia que, através de uma subestação abastecem com a energia gerada a rede elétrica nacional.

A implementação de centrais eólicas em Portugal, inicia-se ainda durante a década de 90, o Parque Eólico Alto Minho localizado em Viana do Castelo com 240 MW, a qual tem 120 aerogeradores, sendo o maior parque do país.

### 3.3.1.1 IMPACTOS

Apesar dos inúmeros benefícios face às energias poluentes, existem impactos que devem ser levados em consideração:

- . a poluição sonora, com eventuais impactos para pessoas ou animais, em regra identificados na fase de projeto;
- . a poluição visual, uma vez que é necessário introduzir um elemento não natural (o aerogerador) na paisagem;
- . a intermitência do recurso eólico, uma vez que nem sempre os regimes de vento são constantes, podendo ser intermitentes, levantando-se questões de segurança de abastecimento ou estabilidade da rede elétrica;

Como vantagens verificam-se, entre outras, as seguintes:

- . Não emissão de dióxido de carbono, durante o processo de transformação de energia;
- . Diminuição da dependência de recursos externos, uma vez que o recurso é endógeno ao país;
- . Recurso inesgotável;
- . Geração de emprego especializado (construção e manutenção).

A instalação de turbinas *offshore* (ao largo) é uma nova aposta, sendo que no caso português se tem vindo a explorar as tecnologias flutuantes, atendendo a que o leito oceânico não permite a fixação diretamente ao solo.

A implementação de novos parques eólicos deverá avançar, atendendo às crescentes necessidades de energia e uma vez que, se verifica que os impactos negativos são inferiores aos proveitos para a sociedade e ambiente.

## 4. LÓGICA DIFUSA (*FUZZY LOGIC*)

A lógica difusa tem por objetivo modelar modos de raciocínio aproximados. Fornece um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana numa forma compreensível pelos computadores. A lógica difusa é um ramo da inteligência artificial que lida com algoritmos de raciocínio usado para emular o pensamento humano e tomar decisões em máquinas. Estes algoritmos são utilizados em aplicações onde os dados do processo não podem ser representados em forma binária. Em contraste com a lógica formal, a lógica Fuzzy atribui valores entre 0 e 1, sendo o valor 1, o seu máximo e 0 o seu mínimo.

Os principais componentes de um controlador de lógica difusa são: Fuzzificação, Regras, Inferência e Defuzzificação, Figura 16.

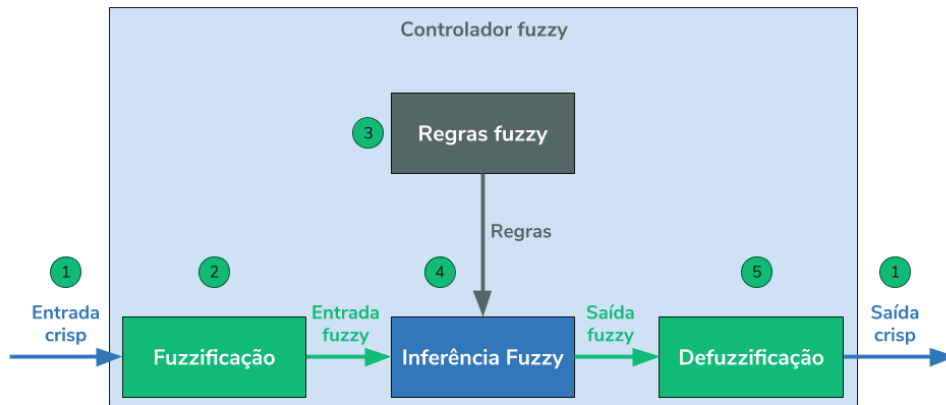


Figura 16 – Controlador *fuzzy*. [20]

## 4.1. FUZZIFICAÇÃO

O processo de Fuzzificação é a interpretação dos dados de entrada (valores *crisp*) do controlador difuso, transformando a entrada em graus de pertinência ou de certeza, produzindo uma interpretação dessa entrada.

Durante a Fuzzificação, o controlador analisa os dados de entrada de acordo com gráficos definidos pelo utilizador, chamados de funções de pertinência. Essas funções agrupam os dados de entrada e o controlador atribui aos dados de entrada, um valor compreendido entre 0 e 1, mediante cada função de pertinência. Esses gráficos representam funções, sendo as mais comuns a triangular, a trapezoidal e a gaussiana.

Ao considerar um conjunto Fuzzy, um elemento  $X$  pertencente ao conjunto universo  $U$  tem um determinado grau de pertinência com relação ao conjunto  $A$ , definido no intervalo  $[0,1]$  e descrito por  $\mu_A(x)$ , onde 0 representa a exclusão total do elemento em relação ao conjunto, e o valor 1 significa a inclusão total do elemento. Um valor entre esses dois valores, representa uma pertinência parcial.

Os conjuntos Fuzzy são definidos por pares ordenados, que indicam cada elemento com o seu grau de pertinência para o conjunto em questão, assim como em (1):

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (1)$$

Um conjunto Fuzzy também pode ser representado, de maneira mais completa, através da expressão, onde o numerador indica o grau de pertinência do elemento representado pelo denominador no conjunto difuso  $\tilde{A}$  e o sinal de adição significa agregação, (2).

$$\tilde{A} = \left\{ \left( \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots \right) \right\} \quad (2)$$

Cada conjunto Fuzzy recebe uma etiqueta para identificá-lo no universo em que está inserido. Cada universo é definido por uma variável, como por exemplo, "Altura". Como exemplo dessas etiquetas, para melhor entendimento, é apresentada a Figura 17.

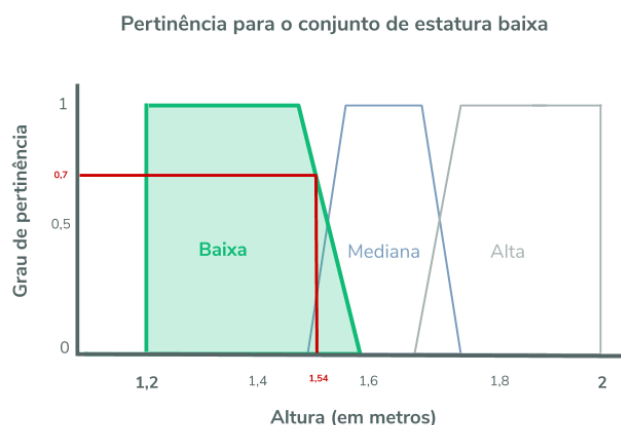


Figura 17 – Pertinência para o conjunto de estatura baixa [21].

Neste exemplo, a altura (metros) é o dado de entrada do problema e encontra-se no eixo horizontal. Para cada valor de altura, é atribuído um valor de pertinência conforme as funções de pertinência. Essas funções são criadas pelo próprio para que o controle tome decisões baseadas em quão alto, quão baixo ou quão médio é a variável altura, para este caso. A altura de 1.4 metros, por exemplo, possui grau máximo de pertinência na etiqueta Baixa, porém, a altura 1.58 metros possui dois graus de pertinência, nas etiquetas Baixa e Mediana. Para que se resulte num único grau de pertinência, nesses casos, é necessário a aplicação de agregações.

Assim como em conjuntos numéricos clássicos, é possível realizar operações com os conjuntos difusos de um mesmo universo através dos métodos de agregação que podem ser de interseção, união e complemento [22].

Essas operações são utilizadas quando um valor *crisp* (entrada real do controlador) possui pertinência em mais do que uma etiqueta. Quando é necessário relacionar dois universos diferentes são utilizadas as relações Fuzzy onde cada elemento de um conjunto possui uma dependência (seja nula ou não) com cada elemento de outro conjunto. Assim, sejam X e Y dois universos quaisquer, uma relação Fuzzy R é um conjunto Fuzzy definido em  $X \times Y$  que associa a cada elemento de  $X \times Y$  um grau de pertinência definido no intervalo unitário, ou seja  $R: X \times Y \in [0; 1]$  [23].

## 4.2. REGRAS FUZZY

O sistema de controle tem outro componente importante que são as regras fuzzy. Elas são utilizadas para ligar diferentes variáveis fuzzy e verificar o seu grau de relacionamento. Cada uma das regras que compõem o conjunto de regras fuzzy são expressas por meio de declaração de IF/THEN.

Para determinar o tamanho da roupa, vamos relacionar a altura e o peso de uma pessoa. Podemos definir a seguinte regra fuzzy:

“Se altura é baixa **E** peso é alto **Então** tamanho é médio.”

## 4.3. INFERÊNCIA

Nessa etapa, temos a análise das regras definidas na etapa anterior com as entradas fuzzy de acordo com as funções de pertinência da etapa de fuzzificação para encontrarmos a região resultante do consequente. Utilizando o método Mamdani, apresentamos a área correspondente ao tamanho da roupa, a partir da altura e do peso de uma pessoa. Vamos supor que temos as seguintes definições para esse sistema:

## Entradas

### Altura

Universo (intervalo de valores *crisp*): Quão alta é a pessoa, considerando uma escala entre 1,20 m a 2 m?

Conjunto fuzzy (intervalo de valores fuzzy): baixa, mediana e alta, Figura 18.

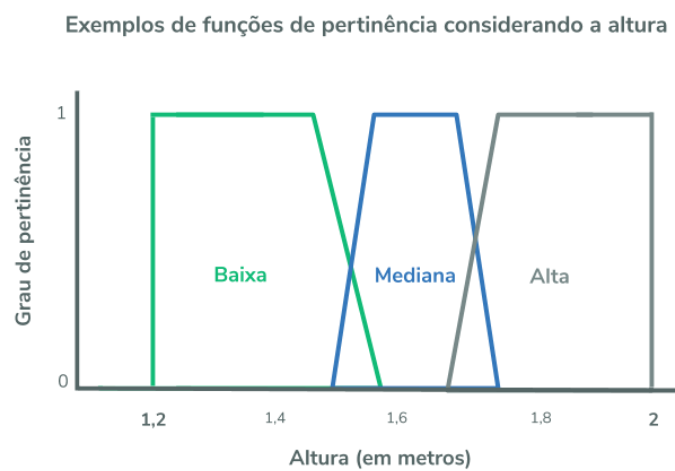


Figura 18 - Função de pertinência para a altura [24].

### Peso

Universo: considerando um valor entre 20 e 120 kg, o quão pesada é a pessoa?

Conjunto fuzzy: baixo, médio e alto, Figura 19.

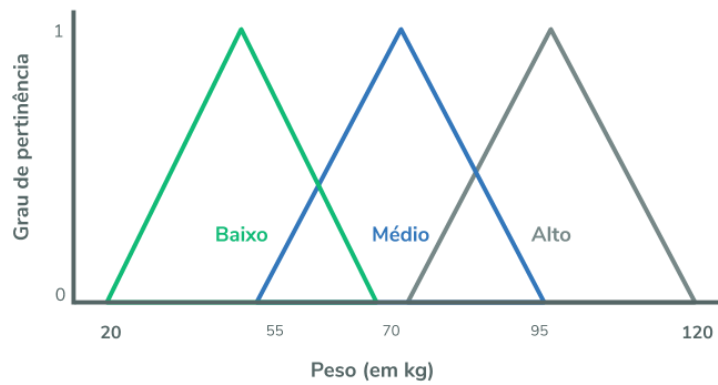


Figura 19 – Função de pertinência para o peso [25].

## Saída

### Tamanho

Universo: Quão grande é o tamanho da roupa, numa escala entre 0 e 1?

Conjunto fuzzy: pequeno, médio e grande, Figura 20.

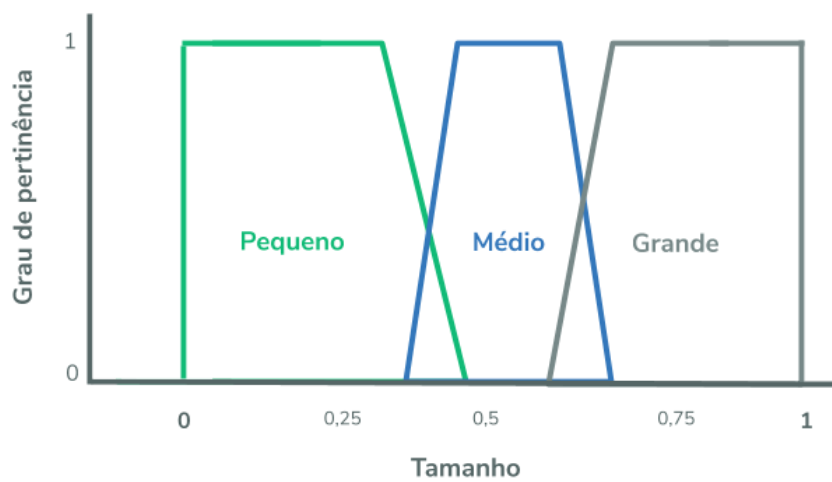


Figura 20 – Função de pertinência para o tamanho [26].

### Regras

1. **SE** peso é baixo **ENTÃO** tamanho é pequeno;
2. **SE** altura é mediana **OU** peso é médio **ENTÃO** tamanho é médio;

3. **SE** altura é alta **E** peso é alto **ENTÃO** tamanho é grande.

Dado o sistema definido acima, vamos fazer a inferência fuzzy ao fornecermos como entrada uma altura de 1,75 m e um peso de 75 kg.

O primeiro passo na inferência fuzzy, utilizando o método Mamdani é fornecer os graus de pertinência de cada variável, para as regras que compõem o sistema e, assim, encontrarmos a região resultante para o consequente (que no nosso caso é o tamanho da roupa).

Região resultante considerando a segunda regra, Figura 21:

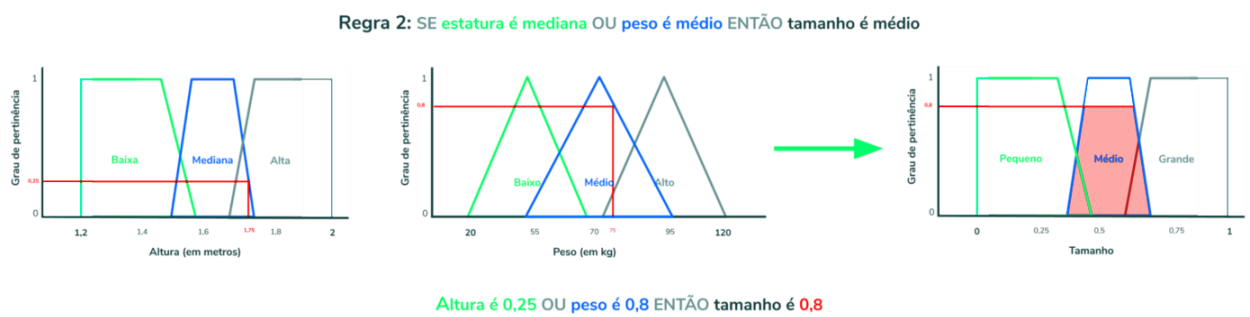


Figura 21 – Região resultante da 2ª regra [27].

Região resultante considerando a terceira regra, Figura 22:

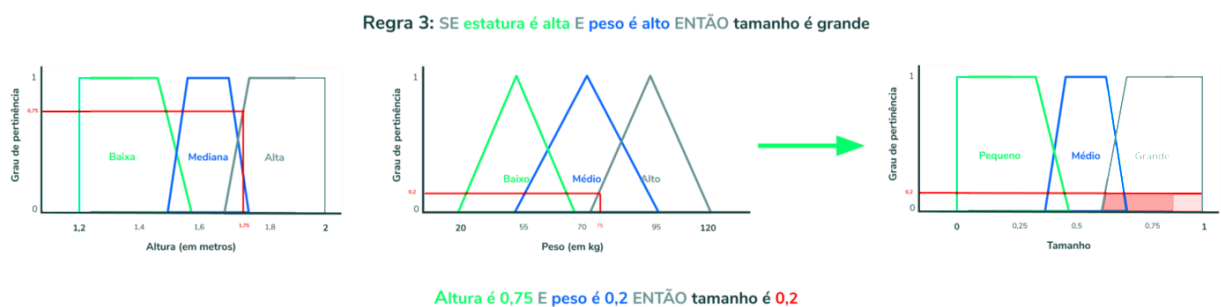


Figura 22 – Região resultante da 3ª regra [28].

Após analisarmos as três regras do sistema, precisamos unir as três regiões obtidas para o consequente. Isso é feito na etapa de agregação das regras, em que as regiões obtidas para cada termo são combinadas em um único conjunto difuso para cada consequente. Abaixo

temos essa unificação das saídas das regras para formar a região resultante destacada a vermelho no gráfico à direita, Figura 23:

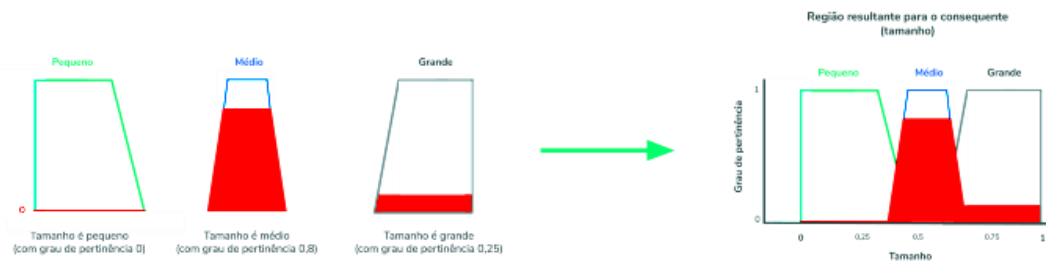


Figura 23 – Região resultante para o tamanho [29].

#### 4.4. DEFUZZIFICAÇÃO

Na defuzzificação, será retornado um valor e não o conjunto fuzzy criado para cada consequente. Nessa etapa, precisamos converter a saída da inferência fuzzy, feita com base nas funções de pertinência e nas regras, para um valor *crisp*. Os valores possíveis do exemplo são discretos, sendo uma altura de 1,75 m e um peso de 75 kg, temos o seguinte valor *crisp* de saída do sistema, Figura 24:

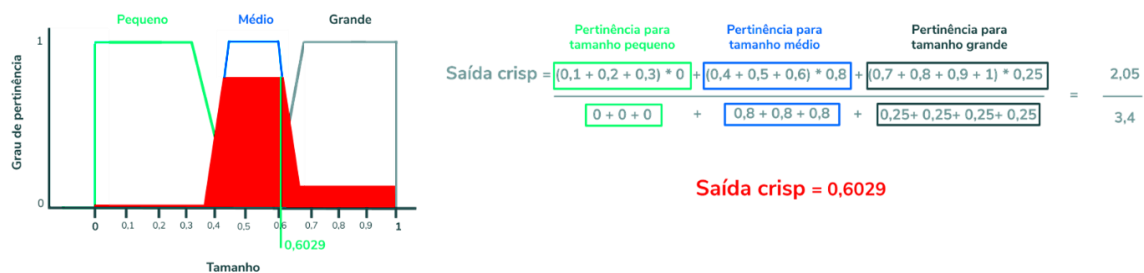


Figura 24 – Saída *crisp* [30].

Na imagem acima, é possível observar que usamos nove pontos diferentes no nosso conjunto fuzzy para calcular o valor *crisp* de saída do sistema (de 0,1 a 0,9, representados no eixo dos XX do gráfico). Para o ponto 0,1, vemos que o seu grau de pertinência para o termo pequeno é 0, por isso ele é multiplicado por 0 assim como os pontos 0,2 e 0,3. Já no ponto 0,4 temos um grau de pertinência de 0,8 para o termo médio, por isso ele é multiplicado por 0,8, assim como os pontos 0,5 e 0,6. Fazemos essas multiplicações pelos graus de pertinência para todos os pontos observados e depois dividimos pela soma dos

graus de pertinência (que são somados de acordo com a quantidade de pontos que foram multiplicados por eles no numerador da divisão) para fazer a média ponderada e, assim, obter o valor *crisp* de saída do sistema.

Portanto, fornecendo uma altura de 1,75 m e um peso de 75 kg para o sistema que criamos de exemplo, a saída desse sistema seria 0,6029. Nesse caso em específico do tamanho da roupa não faz muito sentido olhar a saída *crisp*, visto que é muito mais informativo saber se é pequeno, médio ou grande, mas para casos reais, obter a saída do sistema *fuzzy* como um valor numérico pode ser muito útil para tomar decisões.

Caso quiséssemos utilizar os conceitos de pequeno, médio e grande com base na saída *crisp*, o que poderíamos fazer nesse exemplo é considerar o intervalo do tamanho (que, conforme definimos no universo é: quão grande é o tamanho da roupa, numa escala entre 0 e 1?) e dividi-lo em 3 partes de modo que as saídas *crisp* entre 0 e 0,33 serão consideradas um tamanho pequeno; saídas entre 0,33 e 0,66 serão de tamanho médio; e saídas acima disso serão de tamanho grande. Assim, para esse exemplo em que a saída foi de 0,6029, poderíamos considerar que o tamanho seria médio.



# 5. MODELAÇÃO E CONTROLO — RESULTADOS OBTIDOS

## 5.1. CÉLULA FOTOVOLTAICA

Uma célula fotovoltaica pode ser modelada por um circuito elétrico. A célula fotovoltaica tem como modelo equivalente uma fonte de corrente em paralelo com um diodo como mostrado na Figura 25, onde a saída da fonte de corrente é proporcional à luz que incide sobre a célula. A fonte de corrente ( $I_s$ ) é a corrente elétrica gerada pela incidência da radiação solar e o diodo é atravessado por uma corrente  $I_D$ , que é dependente da sua própria corrente de saturação e da tensão aos terminais da célula fotovoltaica (V) [31].

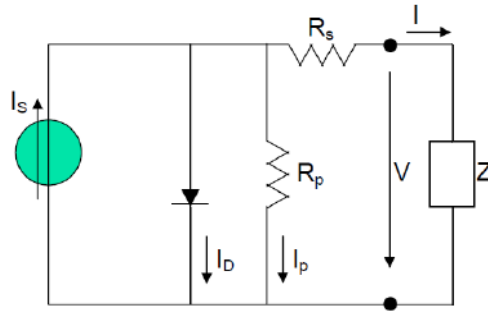


Figura 25 – Circuito elétrico célula fotovoltaica [32].

Em condições de curto-circuito,  $I_s = I_{CC}$ . Esta corrente de curto-circuito  $I_{CC}$ , é o valor máximo da corrente de carga, com valor igual à corrente gerada através do efeito fotovoltaico. Esse valor é característico da célula e fornecido pelo fabricante da mesma nas condições STC (*Standard Test Conditions*), que se cifram nos  $1000 \text{ W/m}^2$  para a radiação incidente e de  $25^\circ\text{C}$  para a temperatura da célula [33].

Em circuito aberto, teremos uma corrente exterior de valor 0 ( $I = 0$ ), que nos proporciona uma corrente inversa de saturação nas condições de referência [34].

Na equação (3), está representado o modelo detalhado da célula fotovoltaica. Este circuito inclui duas resistências,  $R_s$  e  $R_p$ , que representam a queda de tensão no circuito até aos condutores exteriores no caso da primeira, e as correntes de fuga do circuito no caso da segunda resistência.

$$I = I_s - I_o \left( e^{\frac{V}{mV_r}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (3)$$

As células fotovoltaicas compõem o módulo fotovoltaico. Estas células individuais têm um potencial limitado de fornecimento de energia ao nível da tensão de alimentação, porque a tensão em circuito aberto é independente da área das células solares e é limitada pelas propriedades dos semicondutores. Para aumentar a tensão produzida por um módulo fotovoltaico, é necessário colocar as células solares em série [35].

## 5.2. AEROGERADORES

Diferentes aerogeradores possuem diferentes desempenhos. Escolher um modelo que caracterize o desempenho de uma gama alargada de aerogeradores é um princípio de sucesso no planeamento e implementação de um modelo simples.

Dos modelos descritos na literatura que descrevem o desempenho de um aerogerador, existem modelos lineares, modelos baseados nos parâmetros de Weibull e modelos quadráticos. Existem ainda modelos para simulação dinâmica, que caracterizam o aerogerador em todas as fases de conversão de energia, desde o vento até ao controlador de tensão.

As turbinas eólicas têm como função transformar a energia cinética do movimento do ar em energia mecânica através do rotor da turbina e posteriormente, transformá-la em energia elétrica através do gerador. Teoricamente a potência de uma turbina eólica é traduzida pela seguinte expressão:

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times A \times V^3 \quad (4)$$

De notar que, a potência é proporcional à velocidade do vento elevada ao cubo, de modo que, pequenas variações em  $V$ , podem ter um impacto significativo em  $P$ . É importante salientar que, para diferentes tipos de turbina a área de varrimento é calculada de forma diferente, isto é, a área de varrimento do vento de uma turbina de eixo horizontal é diferente da área de varrimento de uma turbina de eixo vertical, Figura 26:

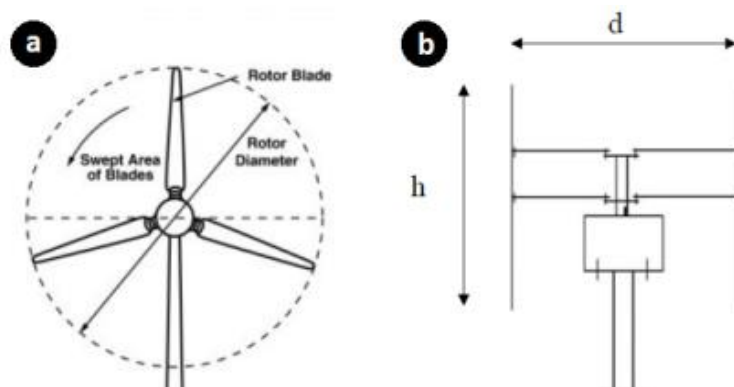


Figura 26 - Área de varrimento a) turbina de eixo horizontal e b) turbina de eixo vertical [38].

Então, a área da turbina de eixo horizontal (a)) é igual a  $A = \pi \times r^2$ , enquanto a área da turbina de eixo vertical (b)), é igual a  $A = d \times h$ . Contudo, a conversão de energia mecânica em energia elétrica não é totalmente assegurada pela turbina eólica. De acordo com o limite de Betz, independentemente da forma construtiva da turbina, apenas 16/27, aproximadamente 59,3% da energia cinética contida no vento, pode ser transformada em energia mecânica. No entanto, a potência total fornecida pelo vento é ainda menor, devido às perdas aerodinâmicas e mecânicas nas turbinas eólicas.

### 5.3. MODELO SIMULINK DE LÓGICA DIFUSA (*FUZZY LOGIC*)

A lógica *fuzzy* caracteriza-se pela capacidade de imitar o pensamento humano, sendo capaz de traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Se um operador humano for capaz de articular a sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma “Se ... Então”, um algoritmo será passível de ser implementado num computador. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, capaz de fornecer uma saída com base em parâmetros de entrada. A maior vantagem de se realizar o controlo MPPT utilizando um controlador *fuzzy* é que não há necessidade de modelar o sistema, como ocorre no caso do projeto de outros controladores. Um sistema MPPT *fuzzy* funciona com duas entradas: o erro do sistema, representado por **E** e a variação deste erro, representada por **CE**. A Equação 5, define essas variáveis. A saída do sistema *fuzzy* é o ciclo de trabalho, **D** (*duty cycle*), que deve ser aplicado ao sinal PWM.

$$E(k) = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (5)$$

Para a determinação do erro,  $E(k)$ , utilizamos o  $P(k)$  e o  $V(k)$ , que são a potência e a tensão geradas pelos painéis, respetivamente,  $P(k-1)$  e  $V(k-1)$  são a potência e a tensão anteriormente geradas pelo sistema, respetivamente. A lógica *fuzzy* para a realização do

MPPT baseia-se no fato de que o controlador, tem de trabalhar para corrigir o ponto de operação do sistema, aproximando-o ao máximo do ponto de máxima transferência de potência. Observando a Figura 27, é possível perceber que existem quatro possíveis situações para o ponto de operação, de acordo com as variações na potência e na tensão. Quando a variação da potência e da tensão é positiva ( $P(k) > P(k-1)$  e  $V(k) > V(k-1)$ ), deve haver um incremento na tensão para mover o ponto de operação em direção ao “Ponto de Máxima Potência” (PMP). No caso da variação na potência ser positiva e na tensão ser negativa, a tensão deve ser decrementada. As condições de cada ponto de operação estão detalhadas na Tabela 2.

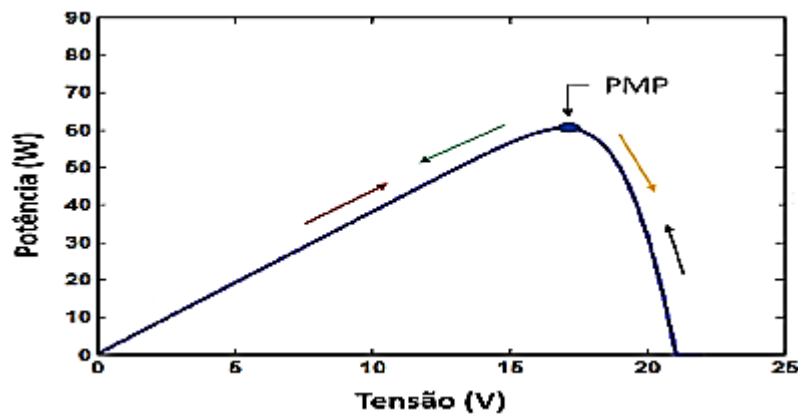


Figura 27 – Ponto de Máxima Potência [39].

Tabela 2 – Funcionamento do algoritmo MPPT

$\Delta P$	$\Delta V$	Ação sobre a tensão
Positivo	Positivo	Incremento
Positivo	Negativo	Decremento
Negativo	Negativo	Incremento
Negativo	Positivo	Decremento

Para o cálculo da variação do erro,  $CE(k)$ , utilizamos o erro atual,  $E(k)$ , subtraído do erro anterior,  $E(k-1)$ , expresso na equação (6).

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (6)$$

Tendo por base os conceitos apresentados anteriormente, foi implementado em Matlab um sistema híbrido constituído por um aerogerador e um painel solar, visando o seu controlo através de lógica Fuzzy. A estrutura do modelo implementado em Simulink seguirá o diagrama de blocos apresentado na Figura 28.

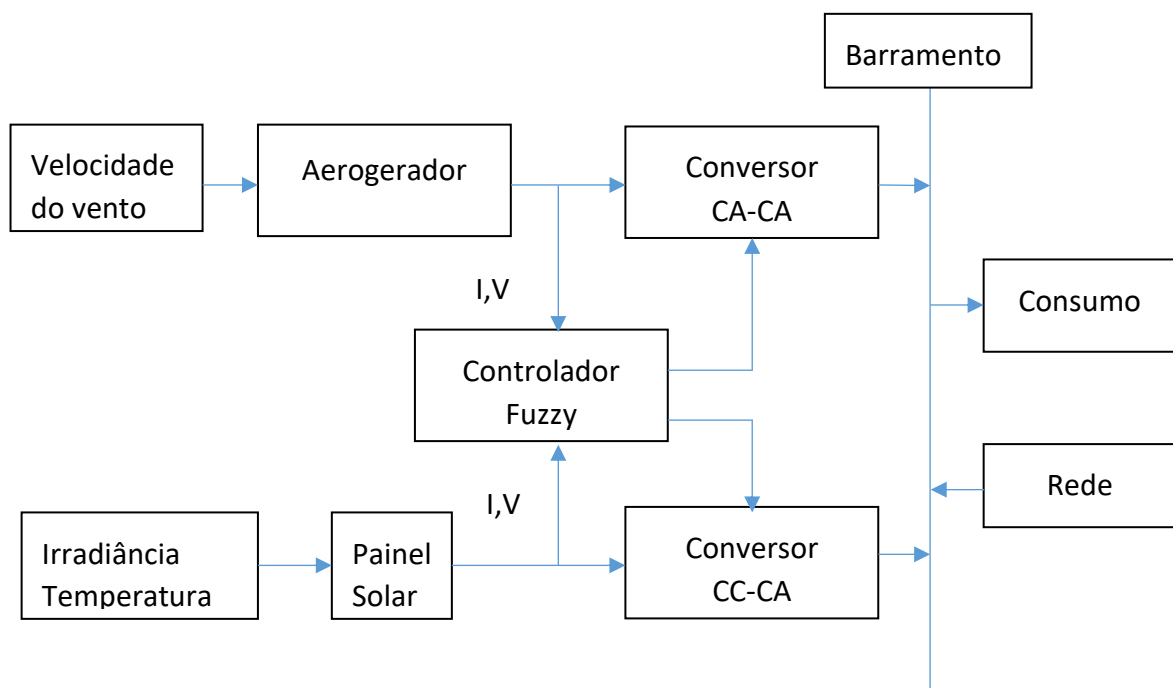


Figura 28 – Diagrama de blocos do modelo híbrido a implementar em Simulink.

A Figura 29, ilustra a implementação do sistema efetuado em Simulink, onde é possível visualizar os dois módulos correspondentes ao controlador fuzzy para as componentes eólica e fotovoltaica.

# Sistema Híbrido Fotovoltaico e Eólico

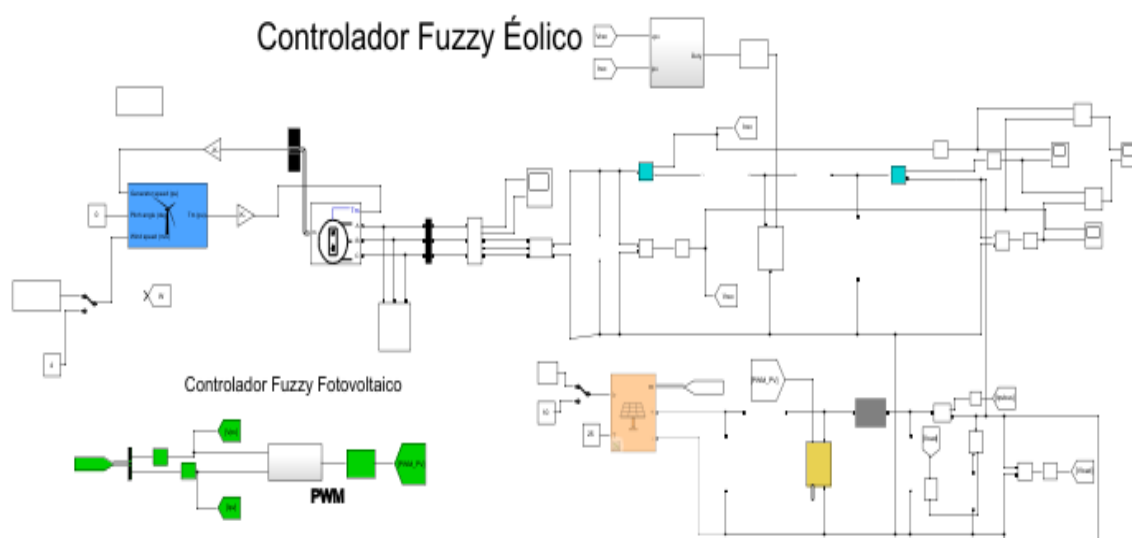


Figura 29 – Modelo principal do sistema em Simulink.

Para a construção de um sistema de inferência difusa (FIS - Fuzzy inference system) recorreu-se à livreria do Matlab *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 30. As variáveis de entrada e de saída para o controlador de lógica difusa estão expressas na Tabela 3.

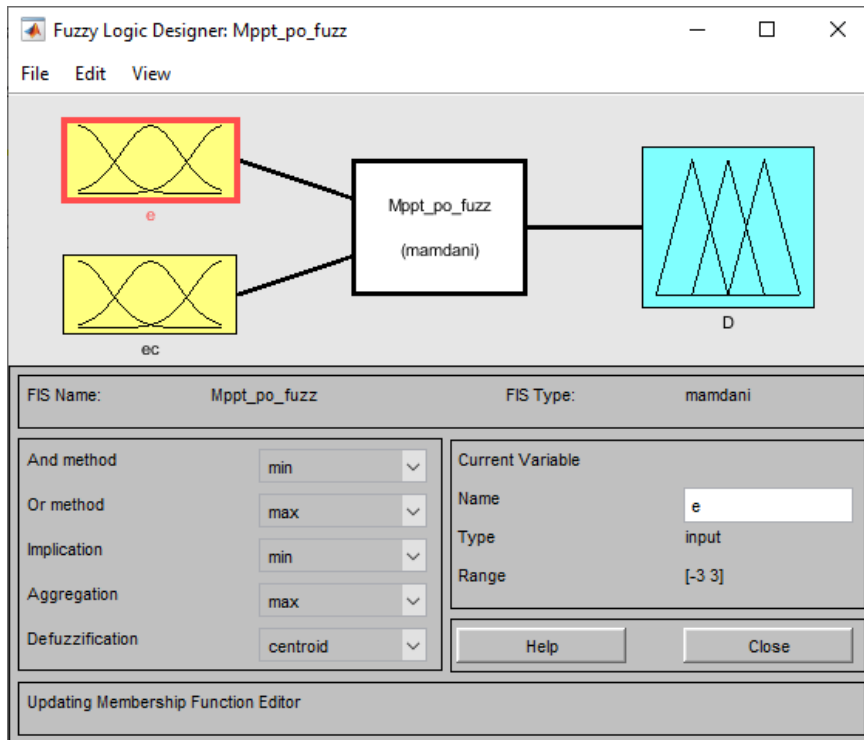


Figura 30 – Controlador *fuzzy*.

Tabela 3 – Variáveis de entrada e de saída do controlador de lógica difusa

Variável de entrada	Intervalo de valores	Variável de saída	Intervlo de valores
E	[-3; 3]	D	[-0,2; 0,9]
EC	[-3; 3]		

A intensidade da corrente e a tensão serão introduzidas no controlador, gerando duas variáveis de entrada que constituirão o erro determinado (E) e a variação do erro (EC) e uma variável de saída, ciclo de trabalho (D), resultante do sistema *fuzzy*, que será a entrada para o novo cálculo do erro, conforme mostrado no fluxograma da Figura 31.



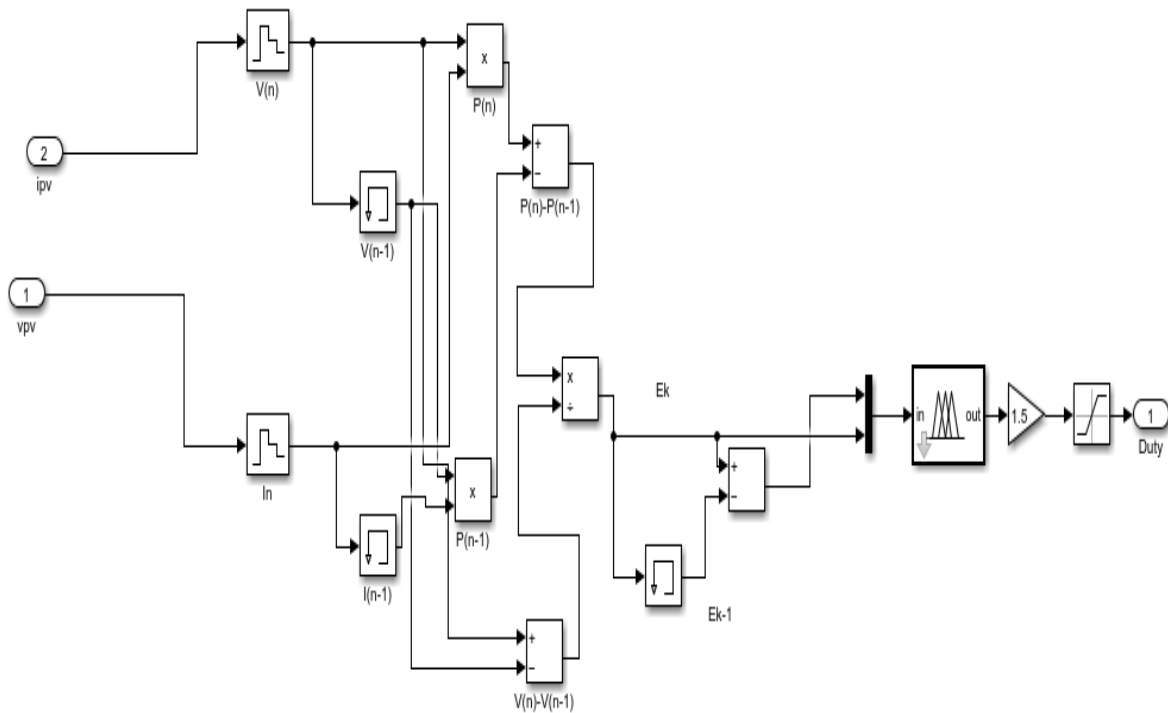


Figura 32 – Implementação do algoritmo *fuzzy* em Simulink

### Fuzzyficação

Em sistemas de Inferência *fuzzy*, consideram-se entradas *não-fuzzy*, ou precisas, resultantes de medições ou observações, que é o caso da grande maioria das aplicações práticas. Em virtude disto, é necessário efetuar um mapeamento destes dados precisos para os conjuntos fuzzy (de entrada) relevantes, o que é realizado no estágio de fuzzyficação. Neste estágio ocorre também a ativação das regras relevantes para uma dada situação. Foram definidos sete conjuntos fuzzy, presentes na Tabela 4, para representar o erro **E** e a variação do erro **CE**: NB (grande negativo), NM (médio negativo), NS (pequeno negativo), Z (erro zero), PS (pequeno positivo), PM (médio positivo), PB (grande positivo). Para a variável **D**, referente ao ciclo de trabalho (*duty cycle*), foram definidos os mesmos conjuntos. As Figuras 33, 34 e 35 exibem as características dos conjuntos *fuzzy* criados.

Tabela 4 – Regras Fuzzy

E/CE	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PB	PB	PM	PS	PS	NM	NM	NB
PM	PS	PS	PS	PS	NS	NM	NM
PS	PS	PS	PS	PS	NS	NS	NS
Z	NS	NS	Z	Z	PS	NS	NS
NS	NS	NS	NS	NS	PS	PS	PS
NM	NM	NS	NS	NS	PS	PS	PS
NB	NM	NS	NS	NS	PS	PS	PM

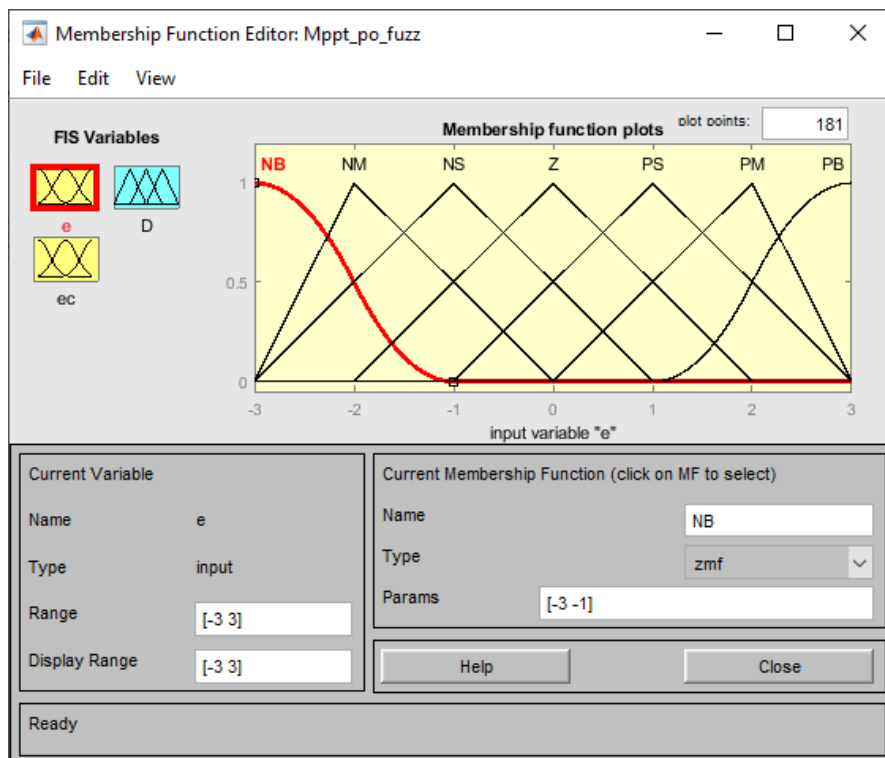


Figura 33 – Variável difusa de entrada - Erro.

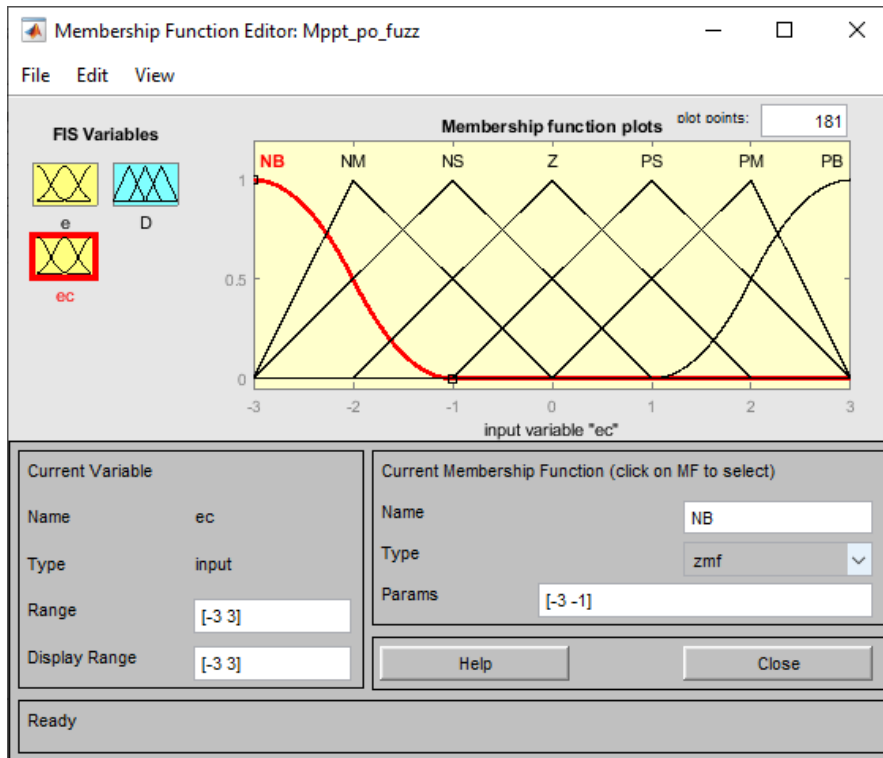


Figura 34 – Variável difusa de entrada - Variação do Erro.

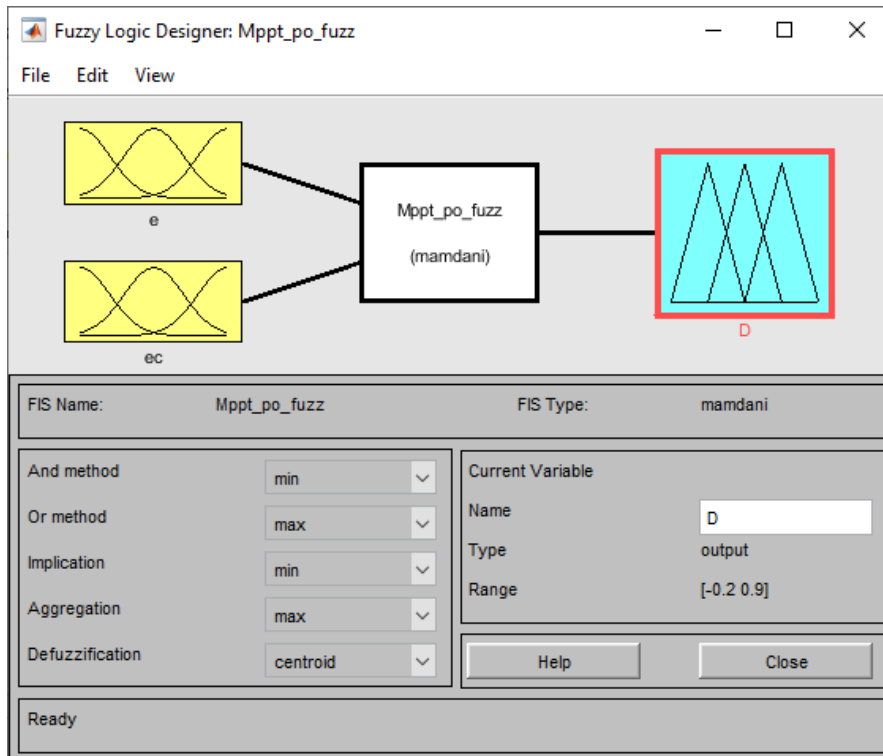


Figura 35 – Variável difusa de saída – Ciclo de Trabalho.

## Inferência

No estágio de inferência é onde ocorrem as operações com conjuntos fuzzy, de acordo com as regras estabelecidas. Neste trabalho é usado o método *Mandani*, sendo as regras utilizadas as mostradas na Tabela 4 e implementadas na Figura 36.

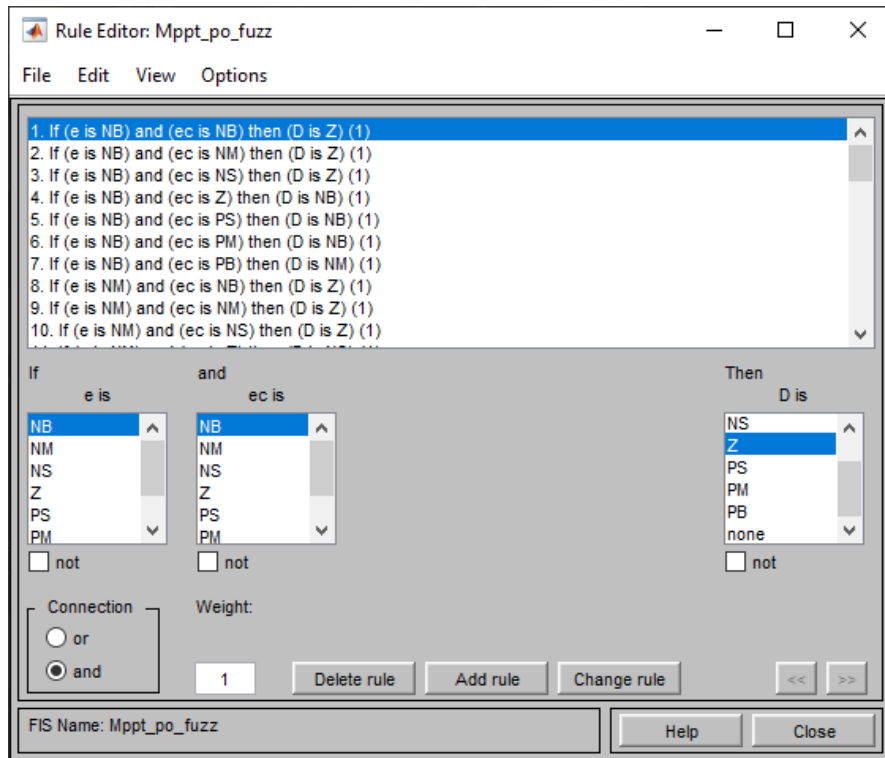


Figura 36 – Implementação das regras *fuzzy*.

## Defuzzyficação

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída através do processo de inferência, a defuzzyficação consiste na interpretação dessa informação. No caso de um sistema de controlo, por exemplo, em que o controlo é efetuado por um sistema de inferência *fuzzy*, este deve fornecer dados ou sinais precisos. Foi utilizado o método centroide para realizar a *defuzzyficação* e gerar a saída do sistema *fuzzy*, apresentado na Figura 37.

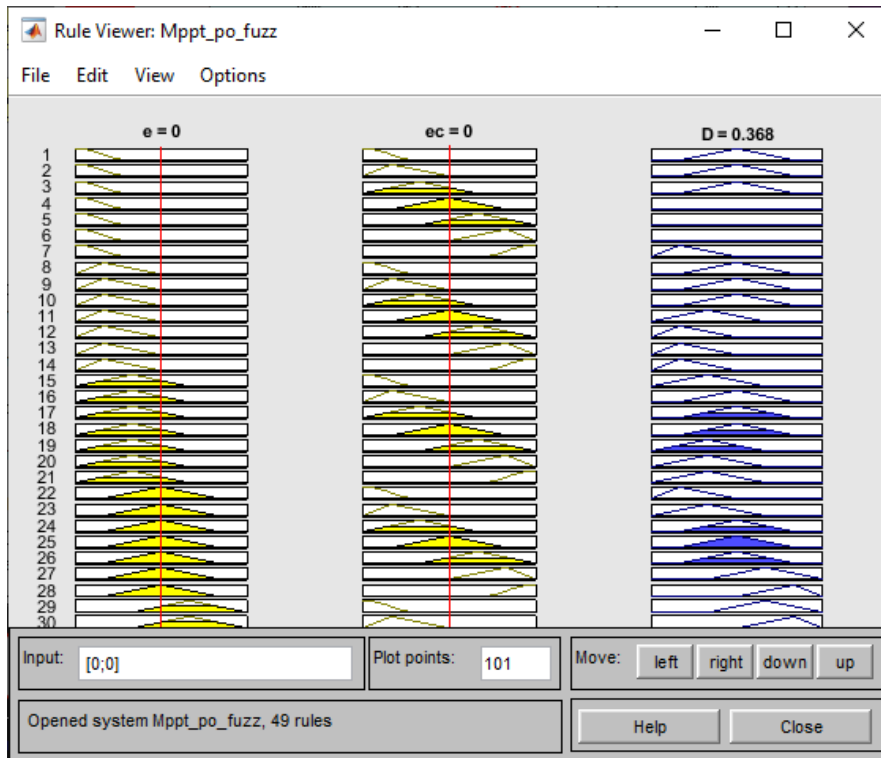


Figura 37 – Visualização gráfica das regras *fuzzy*.

A avaliação por parte do controlador *fuzzy*, pode ser consultada num ambiente gráfico disponível pela aplicação, através do separador "View", e selecionada a opção "Surface", Figura 38. Neste caso, é apresentado um gráfico que representa o resultado da variável de saída **D** (*Dutty Cycle*), para os diferentes valores das variáveis de entrada **E** (Erro) e **EC** (Variação do Erro).

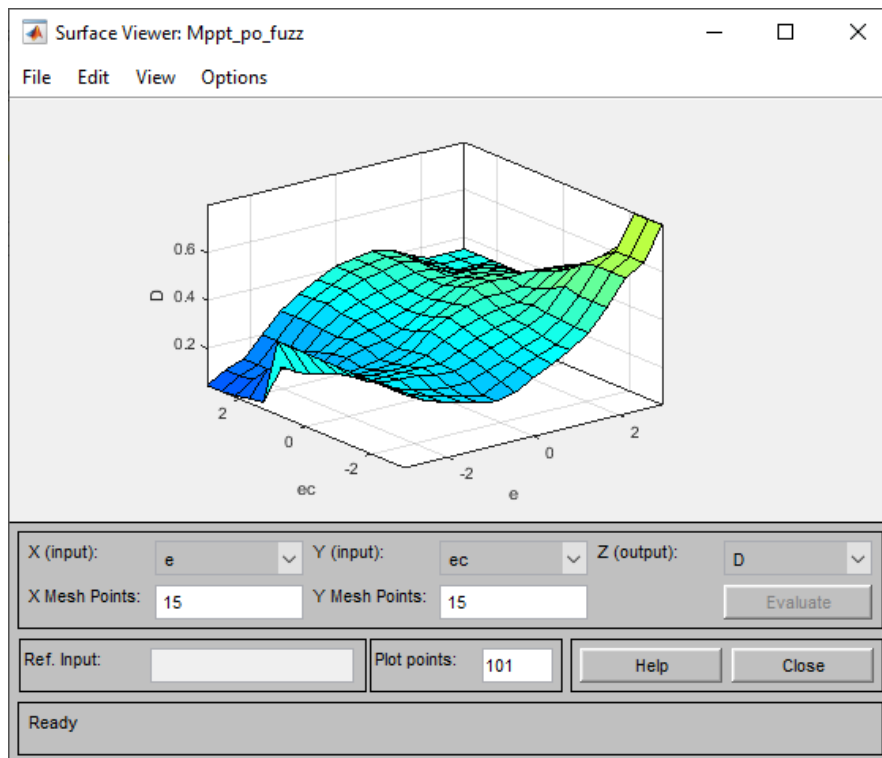


Figura 38 - Gráfico dos resultados *fuzzy* da variável de saída **D**, face aos valores das entradas **E** e **EC**.

## 5.4. RESULTADOS

O sistema foi simulado utilizando o *software* MATLAB/Simulink, através de um modelo de turbina eólica de 3 KW de potência e de um conjunto de painéis solares de 2 KW de potência. Nesta simulação, considerou-se que a irradiância assume o valor de  $1000 \text{ W/m}^2$ , a uma temperatura de  $25^\circ \text{ C}$ , e que os valores do vento estabilizam nos  $10,8 \text{ m/s}$ .

Na Figura 39, podemos observar as alterações da tensão, intensidade da corrente e da potência, em resultado das variações da irradiância. Iniciando com  $1000 \text{ W/m}^2$ , obtemos uma potência de  $2000 \text{ W}$ , com uma irradiância de  $500 \text{ W/m}^2$ , a potência passa para metade, atingindo um valor próximo de zero para uma irradiância de  $10 \text{ W/m}^2$ . Voltando aos valores iniciais de irradiância a potência debitada do sistema fotovoltaico estabiliza nos  $2000 \text{ W}$ .

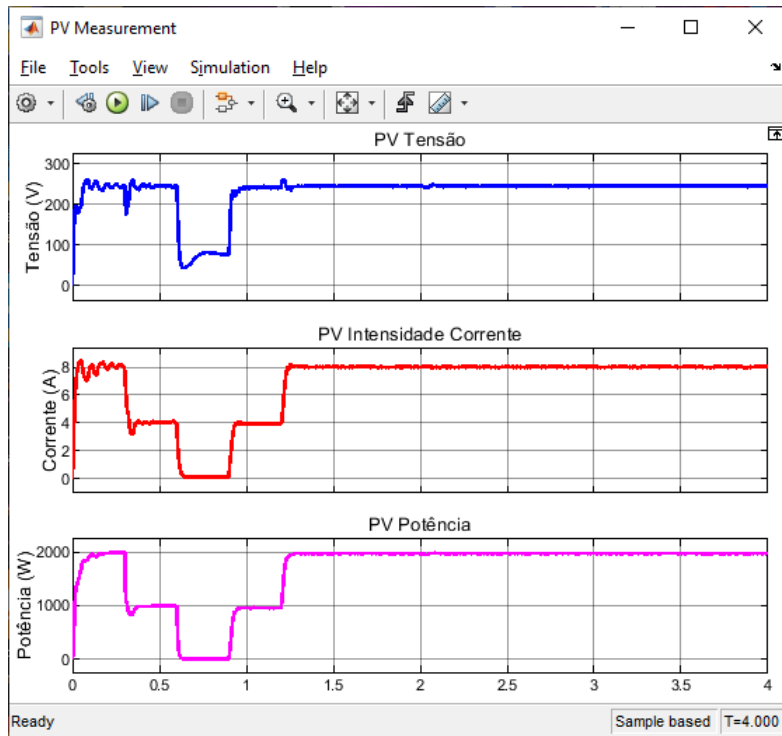


Figura 39 – Gráfico da Tensão, Corrente e Potência dos painéis fotovoltaicos.

O sistema eólico atinge a sua potência máxima (3000 W) para valores de velocidade do vento cifrados nos 12 m/s, estabilizando nos 2100 W para velocidades de vento de 10,8 m/s, evidenciado na Figura 40.

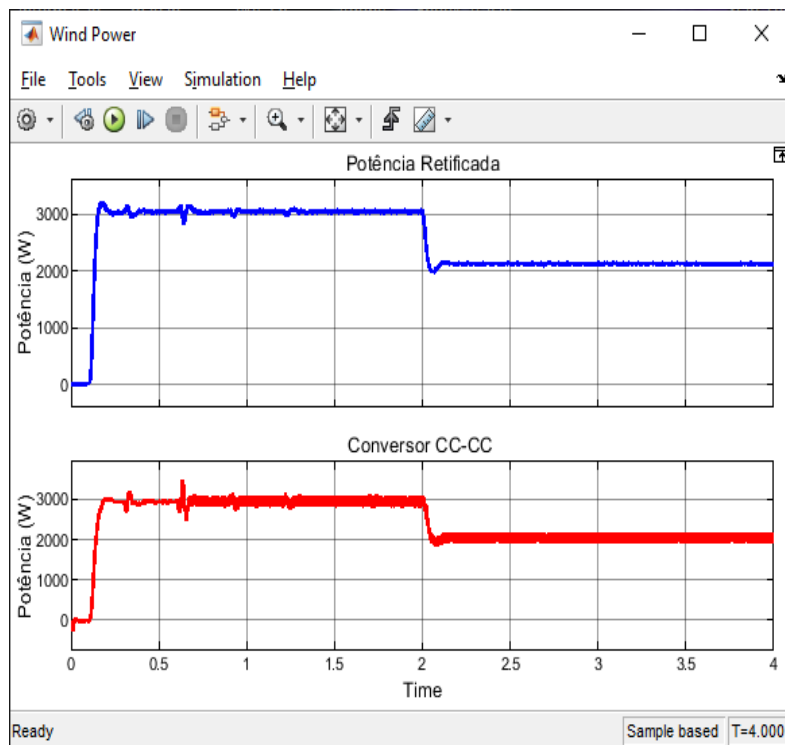


Figura 40 – Gráfico da Potência do sistema eólico.

A Figura 41, representa o consumo da corrente alternada, verificando-se um aumento a partir dos 2 segundos, resultante da diminuição de produção da turbina eólica (ver Figura 40).

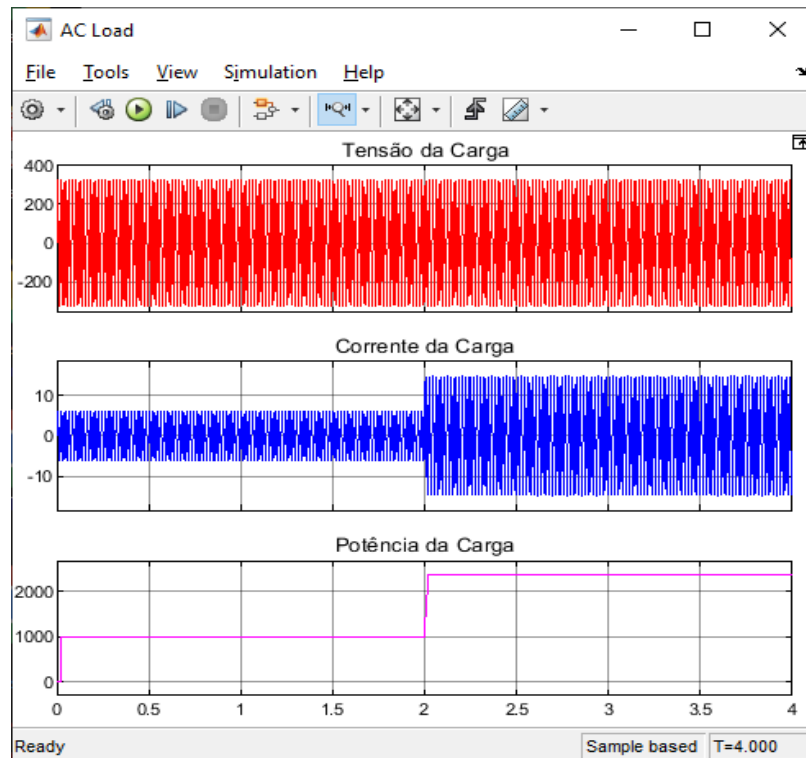


Figura 41 – Gráfico da Tensão, Corrente e Potência da carga.

As alterações de consumo para o sistema híbrido, são compensadas pela injeção de potência da rede, o que se verifica a partir dos 0,7 segundos e 2 segundos, em virtude da diminuição da produção fotovoltaica, inicialmente, e depois pela diminuição da potência eólica, como demonstrado na Figura 42.

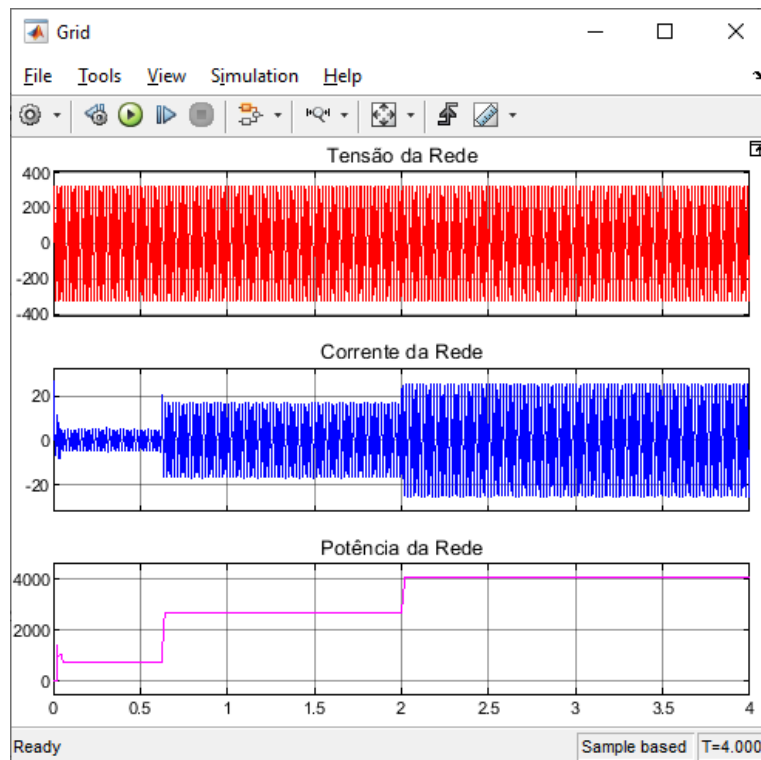


Figura 42 – Gráfico da Tensão, Corrente e Potência da Rede.

A topologia proposta do sistema inteligente de conversão de energia fotovoltaica e eólica e simulada no *software* Simulink, considera diversos valores de irradiância e de velocidade de vento. O controlador fuzzy revelou melhoramentos relevantes no desempenho do sistema, quando comparado com outros controladores presentes na bibliografia. De facto, os resultados mostraram-se eficazes em contraste com as topologias convencionais de controladores integrais, diferenciais e proporcionais (PID).

## 6. CONCLUSÕES

A humanidade terá que alterar o seu comportamento adotando formas de consumo e de vida condizentes com a finitude do planeta terra. O fator energético será o principal para alavancar essa mudança. Os estados terão de incentivar os cidadãos a produzirem a sua própria energia de um modo sustentável. As opções dos sistemas fotovoltaico e eólico são alternativas sérias para a neutralidade carbónica tanto almejada. A implementação de aerogeradores e painéis fotovoltaicos deverá ser aumentada, principalmente em meio urbano, em que a energia eólica atuará em contraciclo com a fotovoltaica. O avanço tecnológico deverá trazer equipamentos mais eficientes e mais económicos. A incorporação de controladores inteligentes fará com que os sistemas rentabilizem ao máximo a receção das fontes de energia. Além disso, como é sabido, a produção de energia

elétrica não acompanha continuamente o aumento do consumo. Com este trabalho, espera-se abrir a possibilidade para debates que consolidem o uso de fontes alternativas de energia, a fotovoltaica e a eólica, de forma a aproveitar esses recursos naturais, presentes em abundância no país, devido à sua característica limpa e renovável, evitando o uso de fontes poluentes que apresentam elevados custos financeiros e ambientais. Do exposto, a microgeração será o amanhã, na qual o consumidor passará a atuar ativamente no processo de geração, para além de possuir o pleno controlo do seu consumo de energia elétrica.

O sistema inteligente de conversão de energia fotovoltaica e eólica desenvolvido, revelou melhorias significativas no desempenho do sistema. De facto, quando comparado com outros estudos desenvolvidos recorrendo a controladores PID, o sistema criado revelou melhores resultados, o que nos leva a concluir que os sistemas híbridos, quando controlados através de algoritmos Fuzzy originam não só uma maior valia para a produção de energia, mas também uma melhoria das questões ambientais, já que se produz energia tendo por base fontes renováveis, como seja o sol e o vento, as quais não introduzem poluição.

## Referências Documentais

- [1] Rathore, N. S.; Panwar, N. I. - Fundamentals of Renewable Energy, CRC Press, 2022.
- [2] Viscusi, W. Kip.; Hersch, Joni; Paying for Climate Change Policies in Europe. Harvard, 2005.
- [3] IEA - Energy for All: Financing access for the poor. OECD/IEA, Oslo, 2011.
- [4] <https://thepowercollective.ca>, acessado em 1/07/2022.
- [5] <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/energia-solar/>, acessado em 20/06/2022.
- [6] <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/energia-eolica/>, acessado 2/07/2022.
- [7] <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/>, acessado em 19/09/2022.
- [8] <https://www.apren.pt/pt/publicacoes/destaques>, acessado em 20/09/2022.
- [9] <https://windeurope.org/>, acessado em 16/08/2022.
- [10] <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/>, acessado em 3/09/2022.
- [11] <https://www.inegi.pt/pt/noticias/hibridizacao-de-parques-eolicos-uma-oportunidade-para-o-setor-2-2/>, acessado em 21/09/2022.
- [12] <https://pt.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>, acessado em 1/05/2022.
- [13] Sousa, F. A., & Oliveira, M. Â. - Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica (p. 24). PUBLINDÚSTRIA, 2010.
- [14] <https://slideplayer.com.br/slide/11115291/39/images/1/ENERGIA+SOLAR+Aureliane+Alves+Santana+HELTON+DA+SILVA+ANDRADE.jpg>, acessado em 4/07/2022.
- [15] <https://www.hrsolar.com.br/site/index.php/como-funciona>, acessado em 14/07/2022.

- [16] <https://www.hrsolar.com.br/site/index.php/como-funciona>, acessado em 14/07/2022.
- [17] Hoogwijk, M. - On the global and regional potential of renewable energy sources. Science, Technology and Society. Ph.D. thesis. Utrecht University. Utrecht, The Netherlands. URL. 2004.
- [18] Pinto, Milton – Fundamentos de Energia Eólica. Ltc. 2013.
- [19] Hinrichs, Roger A. - Energia e meio ambiente. Cengage Learning, 2014.
- [20] <https://medium.com/creditas-tech/combinando-modelos-de-machine-learning-com-l%C3%B3gica-fuzzy-parte-1-b5a9f0761a5d>, acessado em 16/07/2022.
- [21] <https://medium.com/creditas-tech/combinando-modelos-de-machine-learning-com-l%C3%B3gica-fuzzy-parte-1-b5a9f0761a5d>, acessado em 16/07/2022.
- [22] Ross, Timothy J. - Fuzzy Logic with Engineering Applications. John Wiley & Sons, 2010.
- [23] ROMERO, R. A. F. Sistemas Inteligentes. Aula - LABIC - USP. São Paulo, 2018.
- [24] <https://medium.com/creditas-tech/combinando-modelos-de-machine-learning-com-l%C3%B3gica-fuzzy-parte-1-b5a9f0761a5d>, acessado em 16/07/2022.
- [30] <https://medium.com/creditas-tech/combinando-modelos-de-machine-learning-com-l%C3%B3gica-fuzzy-parte-1-b5a9f0761a5d>, acessado em 16/07/2022
- [31] Morais, Josué Lima - Sistemas Fotovoltaicos: da teoria à prática, PUBLINDUSTRIA, 2009.
- [32] Nunes, Hugo Gabriel Garcia Nunes - Modelação e Análise de Sistemas de Geração Fotovoltaica. Universidade da Covilhã. 2017
- [33] CAMUS, C.; EUSÉBIO, E. - Gestão de energia: energia solar. ISEL, 2006.
- [34] Kim, Seul-Ki, et al. "Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis." *Solar Energy* 83.5 (2009): 664-678.
- [35] Diaf, S.; Notton, G.; Belhamel, M.; Haddadi, M.; Louche, A. -. Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions. *Applied Energy* , 85 , 968–987.10.1016/j.apenergy.2008.02.012

- [36] Notton, Gilles. "Hybrid wind-photovoltaic energy systems." *Stand-alone and hybrid wind energy systems*. Woodhead Publishing, 2010. 216-253.
- [37] Sloatweg, J. G; Kling, W. L. - Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations. IEEE, 2008.
- [38] Moreira, José R. Simões – Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. LTC. 2017.
- [39] Pinto, Arthur - Controlador MPPT baseado em Lógica Fuzzy Aplicado a um Sistema Fotovoltaico Conectado a uma Rede. DO - 10.17648/sbai-2019-111205