

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Desenvolvimento de um sistema de produção de energia autónomo

Ricardo Jorge Monteiro Preto

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Adriano da Silva Carvalho

31 de Julho de 2014

A Dissertação intitulada

“Desenvolvimento de um Sistema de Produção de Energia Autónomo”

foi aprovada em provas realizadas em 22-07-2014

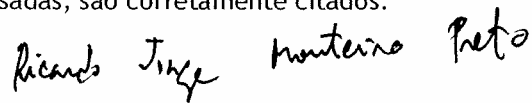
o júri


Presidente **Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa**
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto


Professor Doutor António Carvalho de Andrade
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Electrotécnica do Instituto
Superior de Engenharia do Porto


Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho
Professor Associado do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

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



Autor - Ricardo Jorge Monteiro Preto

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Este documento aborda um tema atual que são as energias renováveis. Os recursos de energia renovável têm-se vindo a afirmar cada vez mais no ramo dos mercados de energia e começam a surgir cada vez mais pessoas/entidades interessadas em se tornarem elas próprias as produtoras de energia, fruto do facto dos mercados de energias renovável também possuírem características atraentes do ponto de vista económico, e também pelo facto das energias renováveis serem "amigas" do ambiente. É também de acordo com o cenário socioeconómico atual que se pretende fazer o presente estudo.

Neste caso, o projeto incide no dimensionamento de um sistema renovável híbrido, que é constituído por dois subsistemas, um subsistema fotovoltaico e outro eólico. No decorrer do documento abordar-se-ão os conceitos gerais das duas tecnologias estudadas, indispensáveis para uma boa compreensão sobre o assunto, bem como aspetos mais técnicos relacionados com cada um dos subsistemas em causa e que culminaram no seu dimensionamento.

O rendimento do sistema híbrido depende dos dois sistemas que o constituem e como tal o estudo e o correto dimensionamento dos mesmos assume um papel relevante neste trabalho.

O trabalho foi desenvolvido em PSIM, que apresenta uma vasta gama de recursos associados aos circuitos eletrónicos.

Importa referir que todo o documento foi redigido segundo a perspetiva de um aluno do ramo de Energia, ou seja, com conhecimentos relativamente limitados na área de controlo dos sistemas. Como tal dar-se-á mais importância aos conceitos mais gerais dos subsistemas abordados do que ao controlo dos mesmos. No entanto, e como um dos objetivos principais da elaboração da dissertação é o aprofundamento de conhecimentos, procurou-se chegar sempre aos melhores resultados práticos possíveis.

Pretende-se que este documento seja útil para futuros projetos na mesma área.

Abstract

This document addresses a current topic nowadays which is renewable energy. The sources of renewable energy have been growing in the energy market, and there has been an emerging interest by some persons/entities in producing their own energy, because renewable energy market has attractive features, economically and environmentally. This study has also been developed in view of the current social and economic setting.

This project focuses on the design of a hybrid renewable system, consisting in two subsystems, a photovoltaic system and a wind system. Throughout a document the general concepts of this two technologies will be addressed, which are essential for a good understanding of the topic, as well as some more technical details concerning in each of the referred subsystems, that allowed their sizing.

The yield of the hybrid system depends of the two subsystems that constitute it, and as such the study and their correct sizing plays an important role in this study.

The current project was developed in PSIM, which features a wide range of tools associated with electronics circuits.

It should be noted that the entire document was written according to the perspective of a Energy - branch student, ie, with relatively limited knowledge in the systems control area. As such, this project focuses on the broader concepts of a subsystems addressed, than the control of the same. However, as one of the main objectives of the elaboration of this thesis is the deepening of knowledge, the best possible practical results have always been a goal to achieve.

It is intended that this document will be useful for future projects in the same area.

Agradecimentos

Gostava de agradecer a todos aqueles que me acompanharam, quer no meu percurso académico quer fora dele, pois sem eles nada disto se tornaria realidade. É nas horas de aperto que se dá conta de quem realmente se importa connosco e é também nessas alturas que se tem a noção de quem vai estar sempre do nosso lado e eu, felizmente, acabei por perceber que tenho muita gente me irá acompanhar nesta minha viagem que é a vida. Sinto-me sortudo por isso!

Queria enumerar alguns nomes, de pessoas que nunca me irei esquecer e cujo seu apoio foi essencial mesmo quando tudo parecia não dar certo. Em primeiro lugar, agradecer aos meus três companheiros de todas as horas, João, Emily e Rafael, que fizeram o caminho deles em paralelo com o meu e que, juntamente comigo, criaram um ambiente de união e amizade que nunca mais vou esquecer. Devo-lhes muito do meu sucesso. Gostaria de agradecer aos colegas de casa que tive até hoje, especialmente ao André Gouveia, mas também ao Pedro Queirós, Brian Carneiro, Diogo Soares e João Freitas, que fizeram com que me sentisse sempre à vontade e me brindaram com a sua amizade todos os dias. Gostava de deixar uma palavra de apreço a outros amigos, da minha antiga casa (ISEP), e que fizeram com que eu me sentisse uma pessoa querida aquando da minha passagem por lá. São eles: Pedro Carvalho, Tiago Vieira, Tiago Noverça, Marco Mota, Ricardo Coelho e Tiago Monteiro. Gostava de agradecer também aos meus amigos de sempre, os de Marco de Canaveses, pois isto é para vocês também, João Teixeira, Fábio Couto, Fábio Daniel, Pedro Monteiro, Hugo Freitas, Jorge Monteiro, Pedro Nogueira e Rui Coutinho. É pela minha família e por vocês que me desloco aos fins-de-semana para o Marco de Canaveses, mesmo não dando jeito às vezes!

Não poderia deixar de agradecer ao meu orientador, Adriano Carvalho, que me ajudou com toda a sua sabedoria e disponibilidade. Deveriam existir muitos docentes como ele. Um muito obrigado ao professor!

Como já diz o velho ditado, o melhor fica para o fim e como tal gostava de agradecer à minha namorada, Diana, que sempre me influenciou de forma positiva ao longo da realização da tese e me deu sempre carinho quando era preciso. Mas, o meu maior agradecimento é direcionado à minha família que sempre esteve comigo, que me proporcionou todas as condições quer emocionais quer financeiras ao longo do meu percurso. A eles (pai, mãe e irmão), que sempre estiveram do meu lado, agradeço do fundo do coração e ficarei sempre a sentir que estarei em dívida para convosco. É por vocês e para vocês que eu faço tudo!

Ricardo Jorge Monteiro Preto

“Nada está feito enquanto resta alguma coisa para fazer.”

Romain Rolland

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Estado da arte	5
2.1	Sistema Eólico	5
2.1.1	Panorama Mundial dos Sistemas Eólicos	5
2.1.2	Estrutura/Tecnologias dos Sistemas Eólicos	8
2.1.3	Características do Sistema Eólico	13
2.2	Sistemas Fotovoltaicos	17
2.2.1	Estado Atual e Futuro da Tecnologia	17
2.2.2	Estrutura/Tecnologias dos Sistemas FV	19
2.2.3	Características do FV	26
2.3	Mercados de Energia	30
2.4	Previsões de produção e carga	32
2.5	<i>Maximum Power Point Tracker</i> (MPPT)	33
2.6	Conversores	33
2.7	Conclusões	34
3	Sistema Eólico	35
3.1	Sistemas Eólicos de Pequena Dimensão	35
3.2	Ações Aerodinâmicas	38
3.2.1	Em perfis estacionários	38
3.2.2	Em perfis de rotação	41
3.3	Controlo de Velocidade e Potência	43
3.3.1	Controlo por <i>stall</i>	43
3.3.2	Controlo por <i>pitch</i>	44
3.3.3	Vantagens e desvantagens dos métodos de controlo estudados	44
3.4	Modelo matemático do SQIG	45
3.5	Cadeia de Conversão <i>Back to Back</i>	49
3.6	Dimensionamento de Sistemas Eólicos	53
3.7	Conclusões	54
4	Sistema Fotovoltaico	55
4.1	Aplicações práticas de Sistemas FV	55
4.2	Tipos de Sistemas Fotovoltaicos	56
4.3	" <i>Maximum Power Point Tracker</i> " em Sistemas Fotovoltaicos	59

4.4	Conversores <i>Buck</i>	65
4.5	Dimensionamento de Sistemas FV	67
4.6	Conclusões	68
5	Projeto do Sistema Global (Eólico e FV)	69
5.1	Metodologia	69
5.2	Modelo PSIM e Resultados	70
5.2.1	Sistema FV	70
5.2.2	Sistema Eólico	74
5.2.3	Sistema Geral	77
5.3	Previsões	80
5.3.1	Previsão do consumo da moradia	80
5.3.2	Previsões de produção eólica	81
5.4	Cálculo das Baterias	83
5.5	Conclusões	84
6	Análise dos resultados	85
6.1	Resultados do Modelo FV	85
6.2	Resultados do Modelo Eólico	86
6.3	Resultados do Modelo Geral	86
7	Conclusão	87
7.1	Conclusões finais sobre a dissertação	87
7.2	Trabalhos futuros	88
	Referências	89
A	Datasheets	93
A.1	<i>Datasheet</i> do painel FV usado	93
A.2	<i>Datasheet</i> da turbina usada	94
B	PSIM	95
B.1	Modelo do painel FV	95
B.2	Modelo da turbina eólica	96

Lista de Figuras

2.1	Moinho eólico; Fonte:[1]	6
2.2	Eólica Atual; Fonte:[2]	6
2.3	Evolução da capacidade eólica instalada nos últimos anos; Fonte: [3]	6
2.4	Países com maior capacidade eólica instalada;Fonte: [3]	7
2.5	Previsão Anual do Mercado; Fonte: [3]	7
2.6	Constituição de um aproveitamento eólico; Fonte: [4]	8
2.7	Constituição de uma turbina; Fonte: [4]	9
2.8	Turbina com eixo vertical; Fonte: [5]	9
2.9	Turbina de eixo vertical <i>Darrieus</i> ; Fonte: [6]	10
2.10	Turbina de eixo vertical <i>Savonious</i> ; Fonte: [7]	10
2.11	Turbina de eixo horizontal "Cata-Ventos"; Fonte: [8]	11
2.12	Turbina de eixo horizontal "3 pás"; Fonte: [9]	11
2.13	Classificação das turbinas; Fonte: [4]	12
2.14	Espectro da velocidade do vento no parque eólico de <i>Brookhaven</i> ; Fonte: [10]	14
2.15	Densidade de probabilidade de <i>Weibull</i> ; Fonte: [11]	15
2.16	Escoamento na zona envolvente de um obstáculo; Fonte: [12]	15
2.17	Valores de rugosidade de diversos tipos de terrenos; Fonte: [10]	16
2.18	Princípio de funcionamento dos painéis solares;Fonte: [13]	17
2.19	Evolução dos consumos FV na UE; Dados: [14]	18
2.20	Constituição de um sistema FV tipo; Fonte: [15]	19
2.21	Evolução da eficiência do FV ao longo dos anos; Fonte: [16]	21
2.22	Esquema elétrico de um módulo FV; Fonte: [17]	26
2.23	Curvas de Corrente-Tensão e Potência-Tensão de um painel fotovoltaico; Fonte: [18]	28
2.24	Curvas de Corrente-Tensão para diferente tipos de radiação ; Fonte: [19]	29
2.25	Inclinação ótima para diferentes épocas do ano ; Fonte: [19]	30
2.26	Evolução da eficiência do FV ao longo dos anos; Fonte: [14]	31
2.27	Percentagem de ER no consumo global energético em Portugal e na UE; Fonte: [14]	31
3.1	Relação entre o diâmetro da turbina e a área varrida pela mesma; Fonte: [20]	36
3.2	Relação entre a altura da turbina e o aumento da velocidade do vento; Fonte: [20]	37
3.3	Objeto sobre ação do vento; Fonte: [20]	39
3.4	Objeto colocado correntemente sobre ação do vento; Fonte: [20]	39
3.5	Decomposição das forças atuantes; Fonte: [20]	40
3.6	Forças que atuam na hélice em movimento; Fonte: [20]	41
3.7	Velocidades e ângulos da hélice da turbina em movimento.; Fonte: [20]	42
3.8	Controlos de potência e velocidade (<i>pitch</i> e <i>stall</i>); Fonte: [21]	45
3.9	Esquema elétrico da máquina de indução; Fonte: [22]	47
3.10	Esquema elétrico do sistema eólico; Fonte: [23]	50

3.11	Diagrama de blocos representativo do controlo de tensão/potência; Fonte: [23] . . .	51
3.12	Relação entre C_p e λ ; Fonte: [23]	52
3.13	Constituição de um sistema eólico ligado à rede; Fonte: [24]	53
3.14	Retificador ligado ao gerador; Fonte: [24]	53
4.1	Sistema FV autónomo isolado da rede; Fonte: [25]	57
4.2	Sistema FV híbrido isolado da rede; Fonte: [26]	58
4.3	Sistema FV ligado à rede; Fonte: [27]	59
4.4	Curva I-V para $T = 25^\circ C$ e $Int_{luminosa} = 1000W/m^2$	60
4.5	Curva I-V para $T = 50^\circ C$ e $Int_{luminosa} = 1000W/m^2$	60
4.6	Curva P-V para $T = 25^\circ C$ e $Int_{luminosa} = 1000W/m^2$	61
4.7	Curva P-V para $T = 50^\circ C$ e $Int_{luminosa} = 1000W/m^2$	61
4.8	Curva I-V para $T = 25^\circ C$ e $Int_{luminosa} = 1200W/m^2$	62
4.9	Curva P-V para $T = 25^\circ C$ e $Int_{luminosa} = 1200W/m^2$	62
4.10	MPPT do sistema FV projetado - Fonte:[28]	63
4.11	Busca do MPP	64
4.12	Busca do MPP no projeto estudado	64
4.13	Esquema elétrico de um sistema <i>buck</i> ; Fonte: [29]	65
4.14	Ondas de tensão e de corrente obtidas à entrada e saída do conversor <i>buck</i>	66
4.15	Consituição de um sistema fotovoltaico ligado à rede; Fonte: [24]	67
5.1	Esquema de simulação em PSIM para o Sistema Fotovoltaico	71
5.2	Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema FV montado com irradiância igual a $1000W/m^2$	71
5.3	Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema FV montado, com irradiância igual a $800W/m^2$	72
5.4	Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema FV montado, com temperatura ambiente igual a $40^\circ C$	73
5.5	Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema FV montado, com variação de temperatura e irradiância	74
5.6	Esquema de simulação em PSIM para o Sistema Eólico	75
5.7	Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema eólico montado	75
5.8	Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema eólico montado com <i>bladepitch</i> igual a 10 graus	76
5.9	Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema eólico montado	77
5.10	Esquema de simulação em PSIM para o Sistema Geral	78
5.11	Curva de potência obtido para o Sistema Geral montado	78
5.12	Curva de potência obtido para o Sistema Geral montado com carga incluída	79
5.13	Esquema de simulação em PSIM para o Sistema Geral com carga em paralelo com a bateria	79
5.14	Diagrama de cargas diário da moradia	80
5.15	Esquema da rede neuronal para previsão de Energia Eólica num local	82
5.16	Comparação entre a produção efetiva e as previsões	82
5.17	Bateria para o sistema em causa	83
A.1	Características do painel FV usado	93
A.2	Características da turbina eólica usada	94
B.1	Modelo do painel FV em PSIM	95

B.2	Parametrização do painel FV	96
B.3	Modelo da turbina eólica em PSIM	96
B.4	Parametrização da turbina	97

Lista de Tabelas

2.1	Relação entre a temperatura, eficiência e perdas numa célula FV - Fonte: [30] . . .	29
5.1	Tabela que serviu de base à construção do diagrama de cargas diário	81

Abreviaturas e Símbolos

ADT	Abstract Data Type
AC	<i>Alternat Current</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
Cp	Power coeficient
DC	<i>Direct Current</i>
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EDP	Electricidade de Portugal
EE	Energia Elétrica
EF	Energia da fonte
EPSI	European Photovoltaic Industry Association
ER	Energias Renováveis
FV	Fotovoltaico(a/s)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GWEC	Global Wind Energy Council
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IV	Infravermelho
I-V	Corrente-Tensão
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P-V	Potência-Tensão
PR	Performance Ratio [Índice de Performance]
PV	<i>Photovoltaic(s)</i>
PSIM	Power Simulation
REN	Rede Energética Nacional
RN	Redes Neuronal
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator (Gerador de indução em Gaiola de esquilo)
STC	Standard Test Conditions
TEP	Toneladas Equivalentes de Petróleo
UE	União Europeia
UV	Ultravioleta
V	Volt
WWW	<i>World Wide Web</i>

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta uma breve introdução ao tema e o porquê de se realizar este projeto. Apresenta-se também os objetivos inerentes à execução deste projeto no âmbito da disciplina "Dissertação" referente ao Mestrado de Engenharia de Eléctrotécnica e de Computadores na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Por fim, apresenta-se uma descrição sobre a forma como o documento se encontra organizado.

1.1 Enquadramento

Portugal possui excelentes condições para a aplicação de estratégias que promovam o recurso a energias renováveis, nomeadamente à energia solar e à energia eólica, uma vez que possui boas características de luz solar e de vento, fruto da sua localização geográfica.

De acordo com o contexto socioeconómico atual, surge cada vez mais a necessidade de recorrer a mecanismos que conduzam à implementação de sistemas inovadores quer ao nível económico quer ao nível ambiental. Foi neste sentido que surgiram, há alguns anos atrás, as energias renováveis com a implementação de sistemas de elevada dimensão, como parques eólicos ou parques de painéis fotovoltaicos, sendo que, atualmente, a implementação de sistemas de menores dimensões e com o objetivo de satisfazer necessidades domésticas faz cada vez mais sentido.

É nesse contexto que se realiza este projeto (Desenvolvimento de um sistema de produção de energia autónomo), com vista a implementar um sistema de produção híbrida que combine produção de energia fotovoltaica e energia eólica, cujo objetivo é satisfazer os consumos energéticos de uma moradia unifamiliar e que ao mesmo tempo seja capaz de fornecer energia à rede eléctrica, procurando-se obter ganhos significativos com isso, economicamente falando.

Todo este projeto assenta numa política de sustentabilidade quer ao nível energético quer ao nível económico, procurando proteger os recursos naturais fósseis do inevitável caminho para a sua própria extinção, indo de acordo com a crescente sensibilização para as alterações climáticas e, ao mesmo tempo, procurar descentralizar a produção de energia eléctrica por parte dos grandes

centros produtores, isto é, centrais térmicas, hídricas ou nucleares. O facto de se diminuir a dependência dos combustíveis fósseis faz com que se reduza também a dependência externa, devido à importação de combustíveis fósseis.

Pelas razões enumeradas e também pelo facto dos microprodutores serem impulsionados pelos próprios políticos do nosso país, a produção de energia por parte dos microprodutores vem assumindo um papel cada vez mais importante no sector energético no panorama nacional.

1.2 Objetivos

O principal objetivo do projeto efetuado nesta dissertação passa por desenvolver um sistema de produção de energia que seja capaz de satisfazer os consumos de uma moradia unifamiliar e ao mesmo tempo fornecer energia elétrica à rede elétrica. Com a elaboração deste projeto, pretende-se ter uma visão mais aprofundada de todos os aspetos a ter em conta na elaboração de projetos semelhantes a este. Um projeto destes passa por diversas fases, sendo que todas elas são importantes. As fases mais importantes deste trabalho foram:

- Considerar um diagrama de cargas da moradia a satisfazer;
- Pensar num sistema produtor que seja capaz de fornecer energia à rede e que garanta os consumos da moradia em causa;
- *Design* do sistema produtor, com todos os componentes necessários ao seu bom funcionamento e operacionalidade;
- Simulação de vários cenários de produção dos subsistemas;
- Análise dos resultados obtidos;

1.3 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, este documento contém mais seis capítulos.

O capítulo dois diz respeito ao estado da arte. Nele pretende-se apresentar os conceitos mais gerais sobre as temáticas discutidas ao longo de todo o documento, como é o caso do sistema eólico, do sistema fotovoltaico, dos mercados de energia, das previsões de produção e de consumos, do MPPT e também dos conversores.

No capítulo três aborda-se mais concretamente o sistema eólico, desta feita incidindo sobre assuntos mais técnicos e que permitem um bom enquadramento sobre o tema.

Da mesma forma que se abordou os sistemas eólicos e algumas das vertentes associadas ao mesmo, no capítulo quatro aborda-se os sistemas FV segundo uma componente mais técnica/profunda, comparativamente ao que se fez no estado da arte, focando aspetos como o MPPT e os conversores bem como a sua implementação em sistemas FV.

No que diz respeito ao capítulo 5, este refere-se ao sistema projetado. Nesse capítulo explica-se a metodologia seguida durante o projeto, os modelos PSIM desenvolvidos e os resultados associados aos mesmos perante vários cenários testados, os dados das previsões e o cálculo das baterias para o sistema.

No capítulo seis faz-se uma análise dos resultados obtidos nos modelos simulados em PSIM.

O capítulo sete diz respeito às conclusões gerais sobre o trabalho realizado durante a Dissertação, referindo-se também aspetos do trabalho que podem ser melhorados no futuro.

Capítulo 2

Estado da arte

Neste capítulo pretende-se abordar de uma forma geral alguns dos aspetos mais conhecidos sobre os sistemas em causa, isto é, o sistema eólico e o fotovoltaico, bem como outros aspetos a ter em conta neste projeto, como os mercados de energia, as previsões, o MPPT e os conversores. Assim como já foi mencionado, trata-se apenas de uma abordagem geral, mas sem a qual não se poderia entender de uma forma correta os capítulos seguintes do documento, sendo que nos capítulos seguintes se efetuará uma análise mais pormenorizada sobre as temáticas abordadas neste capítulo, sobretudo aquelas que dizem respeito à parte mais técnica do projeto.

2.1 Sistema Eólico

2.1.1 Panorama Mundial dos Sistemas Eólicos

A história dos sistemas de geração de energia através da energia proveniente do vento começou a ser escrita há milhares de anos. As primeiras instalações eólicas, os moinhos, tinham como objetivo satisfazer necessidades agrícolas e foram utilizados na Pérsia e no Médio Oriente [4]. Depois, novas formas de utilizar a energia eólica foram surgindo um pouco por todo o Mundo. No séc. XI, este tipo de mecanismo passou a ser cada vez mais utilizado no Médio Oriente, em campos agrícolas [31] e a moda ganhou vida um pouco por toda a Europa. Surgiram então novas aplicações para aproveitamentos eólicos, como por exemplo, extração de água para campos agrícolas e fazendas, sendo que mais tarde passou-se a usar estes sistemas para produzir energia elétrica, à semelhança do que acontece atualmente. Na figura 2.1 pode-se observar um moinho persa e na figura 2.2 uma turbina eólica atual.

Este tipo de mecanismo foi evoluindo ao longo do tempo, passando de um sistema que utilizava eixos verticais para aplicar o princípio de arrasto da energia do vento (encontrados nos países Árabes), para sistemas como aqueles que podemos observar hoje (figuras 2.1 e 2.2).

A popularidade desta tecnologia andou sempre de braço dado com a flutuação dos preços dos combustíveis fósseis. Após a Segunda Guerra Mundial, e com o abaixamento dos preços dos combustíveis fósseis, a procura de sistemas eólicos baixou também, no entanto, por volta de 1970 quando o preço do petróleo disparou, disparou também o interesse pela produção de energia eólica.



Figura 2.1: Moinho eólico; Fonte:[1]



Figura 2.2: Eólica Atual; Fonte:[2]

A tecnologia de turbinas eólicas começou então a ser usada e testada, gerando eletricidade para ser injetada na rede [31].

Posto isto, e apesar de alguns avanços e recuos desta tecnologia, o recurso a energias renováveis tem vindo a aumentar nos últimos anos, sendo que a principal causa para essa tendência se prende com a escassez dos recursos fósseis aliada ao aumento da procura de energia elétrica [20], na sociedade cada vez mais industrializada. Por seu lado, os sistemas eólicos possuem uma capacidade de potência cada vez maior, bem como mecanismos que tornam os sistemas cada vez mais fiáveis, principalmente ao nível da eletrónica de potência. Para além disso, o preço da energia produzida pelos sistemas eólicos tem vindo a aproximar-se progressivamente do preço da energia produzida pelas fontes convencionais (grandes centrais), o que torna a energia eólica uma tecnologia mais atraente [20]. Na figura 2.3 é possível verificar a crescente evolução da utilização deste recurso ao longo dos últimos 18 anos, ao nível global.

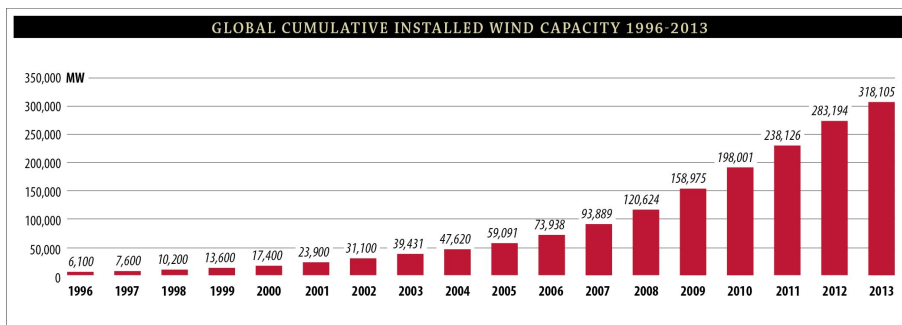


Figura 2.3: Evolução da capacidade eólica instalada nos últimos anos; Fonte: [3]

Hoje em dia, a energia eólica é uma fonte de energia estabelecida em mais de 50 países, sendo que a maior capacidade instalada está presente nos países mais industrializados como os Estados Unidos da América, China, Alemanha ou Espanha [20]. Pode se verificar essa mesma tendência na figura 2.4.

No que diz respeito ao futuro dos sistemas eólicos, tudo indica que a procura tende a aumentar, a julgar pelos dados fornecidos pela GWEC[3] (*Global Wind Energy Council*), que se podem consultar na figura 2.5. De acordo com os gráficos, facilmente se percebe que a evolução do

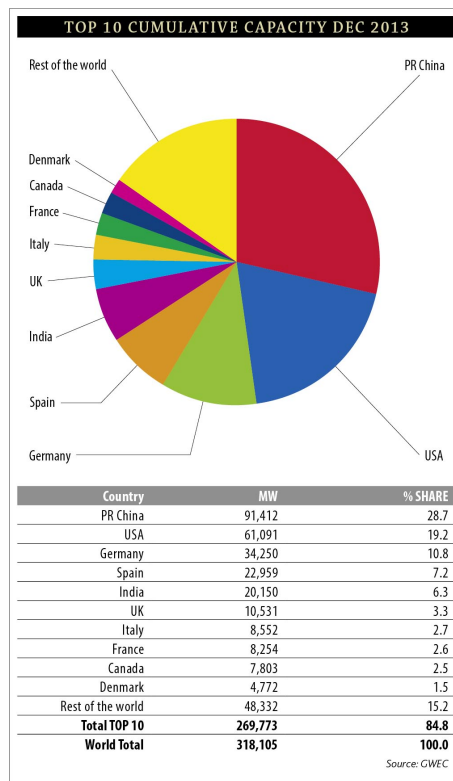


Figura 2.4: Países com maior capacidade eólica instalada; Fonte: [3]

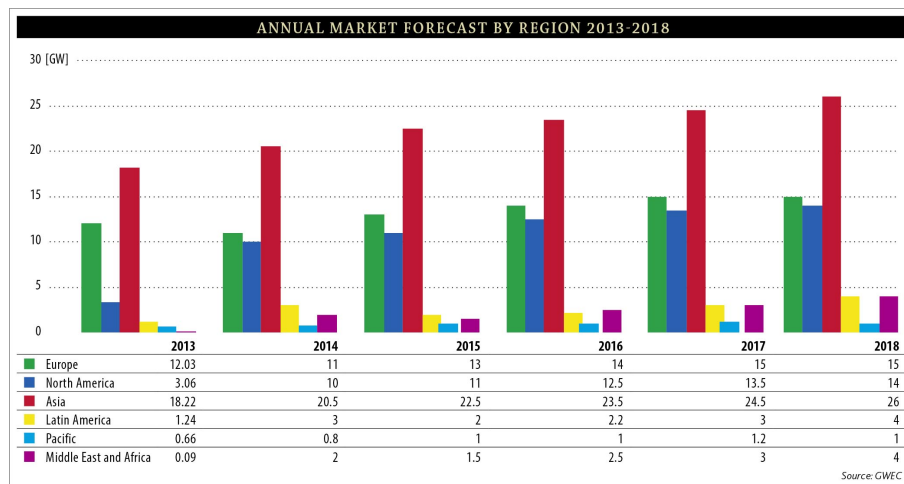


Figura 2.5: Previsão Anual do Mercado; Fonte: [3]

recurso à energia eólica é positiva e que faz cada vez mais sentido olhar para esta como uma solução a ter cada vez mais em conta por parte dos consumidores ou microprodutores.

2.1.2 Estrutura/Tecnologias dos Sistemas Eólicos

Os sistemas de geração de energia eólica são divididos em dois grandes grupos, sendo eles os sistemas de alta e baixa potência [20]. O que distingue estes dois grupos de geração é, para além da capacidade de produção, a estrutura dos próprios sistemas, sendo que o núcleo central é bastante parecido quer para os sistemas de elevada potência, quer para os de baixa potência. Independentemente das diferentes tipologias passíveis de ser utilizadas nos sistemas eólicos, o principal objetivo passa por conseguir uma harmonia perfeita entre os diferentes elementos que constituem o sistema, com vista a obter o máximo rendimento possível para o sistema.

Um aproveitamento eólico é constituído fundamentalmente pelos seguintes elementos:

- Turbina Eólica;
- Gerador;
- Eletrónica de potência associada.

Na figura 2.6 pode se ver a constituição de um sistema de uma forma mais pormenorizada.

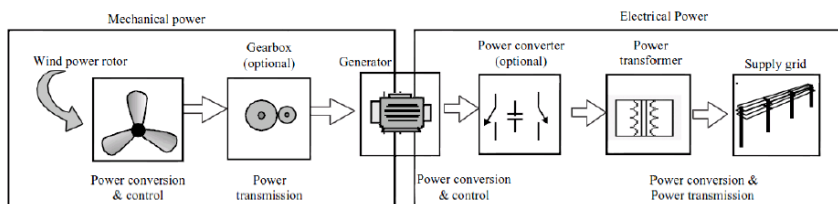


Figura 2.6: Constituição de um aproveitamento eólico; Fonte: [4]

De todos os elementos presentes na lista acima, destacam-se a turbina eólica e o gerador, uma vez que quando se aborda o assunto dos Sistemas Eólicos são os primeiros elementos que surgem. A turbina tem como variáveis de estado a velocidade do vento, velocidade angular da turbina, potência mecânica e os parâmetros construtivos. Na figura 2.7 pode-se observar a constituição de uma turbina eólica.

A figura 2.7 ilustra de uma maneira pormenorizada a constituição de uma turbina eólica, permitindo ter uma ideia mais concreta sobre a composição da mesma.

- **Rotor:** Trata-se do elemento responsável por captar e transformar a energia cinética contida no vento e transforma-la em energia mecânica. Existem dois tipos de turbina eólica, de acordo com a posição de veio em relação à direção do vento, e a forma de controlo das forças aerodinâmicas exercidas nas pás da turbina [4].

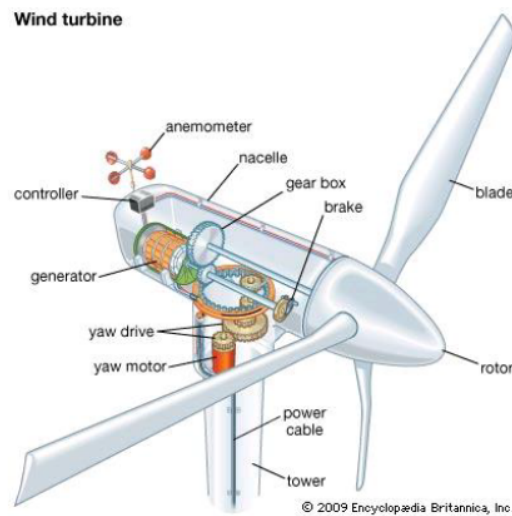


Figura 2.7: Constituição de uma turbina; Fonte: [4]

As turbinas de eixo vertical caíram em desuso, devido ao facto de estas terem um baixo aproveitamento da energia do vento, apesar de apresentarem algumas vantagens relativamente à sua estrutura [20]. Hoje em dia, as turbinas de eixo vertical usam-se apenas em ambientes urbanos, devido à sua facilidade de aproveitar ventos turbulentos e pelo facto de produzirem baixo ruído, sendo utilizadas essencialmente em sistemas de baixa potência. Para além disso, este tipo de turbina tem facilidade de simplificar os mecanismos de transmissão de potência. No que diz respeito às desvantagens, estas turbinas apresentam um baixo rendimento uma vez que, devido ao movimento de rotação das suas pás, não aproveitam ao máximo o potencial dos ventos isto porque o “ângulo de ataque” e de deslocamento em relação do vento muda constantemente, causando até uma certa turbulência por toda a estrutura do sistema eólico [20]. Para ter uma melhor percepção do que se está a falar, pode-se observar a figura 2.8.



Figura 2.8: Turbina com eixo vertical; Fonte: [5]

Dentro das turbinas de eixo vertical podemos distinguir dois tipos, as *Darrieus* e as *Savonius*,



Figura 2.9: Turbina de eixo vertical *Darrieus*; Fonte: [6]

que diferem entre si no que diz respeito à sua estrutura. O modelo *Darrieus*, que é conhecido por ter uma forma idêntica a uma “batedeira”, já foi muito usado por todo o Mundo na geração de energia, pois apresenta o maior rendimento de entre todas as turbinas de eixo vertical e além disso as suas pás são construídas segundo perfis aerodinâmicos, no entanto, necessitam de um elevado binário de arranque, o que fez com que fossem cada vez menos utilizadas [20]. As turbinas *Darrieus* (2.9) têm como curiosidade o facto de prescindirem de torre, facilitando a sua manutenção [4][32]. No que diz respeito às turbinas *Savonius*, estes tipos de turbinas são utilizadas em instalações de menor potência, são mais robustas e têm um custo mais baixo quando comparadas com as *Darrieus* [4]. Este tipo de turbina foi muito utilizada no passado para o bombeamento de água, porém, o seu rendimento é o mais baixo de todas as turbinas[20]. Na figura 2.10 pode-se visualizar uma turbina do tipo *Savonius*, sendo que não é muito comum encontrar exemplares idênticos.



Figura 2.10: Turbina de eixo vertical *Savonius*; Fonte: [7]

No que toca às turbinas de eixo horizontal, existem diversos tamanhos e modelos, quer para grandes quer para pequenas potências. O rendimento deste género de turbina anda à volta dos cinquenta por cento, sendo que o maior ponto de diferenciação entre as turbinas é o número de pás.



Figura 2.11: Turbina de eixo horizontal "Cata-Ventos"; Fonte: [8]

Existem turbinas de uma, duas ou três pás, existindo também as turbinas multi-pás, conhecidas como “cata-ventos”. O rotor tem que estar posicionado de maneira a que seja possível aproveitar da melhor forma a direção do vento [20]. Para garantir esse “alinhamento” as turbinas possuem uma espécie de um mecanismo automático, que permite acompanhar as variações da direção do vento [20]. Normalmente o tipo de turbina horizontal mais usual é a de 3 pás, havendo também um número considerável de turbinas “cata-ventos” para instalações de baixa potência, tendo como maior aplicação o bombeamento de água. Ainda no que diz respeito aos “cata-ventos”, importa referir que estes apresentam uma boa relação entre o binário de arranque e a área de varredura do rotor, no entanto verifica-se que estas instalações conseguem ter o seu maior rendimento para velocidades de vento reduzidas, limitando assim a potência máxima extraída por área do rotor, o que torna os “cata-ventos” pouco adequados para a produção de energia elétrica. Na figura 2.12 pode se observar uma turbina constituída por 3 pás e na figura 2.11 é possível visualizar um “cata-ventos”.



Figura 2.12: Turbina de eixo horizontal "3 pás"; Fonte: [9]

Na figura (2.13) abaixo apresenta-se um diagrama com um resumo da classificação das turbinas eólicas, onde se podem visualizar os vários tipos de turbinas que é possível encontrar.

Para além das turbinas eólicas, outro elemento essencial nos aproveitamentos eólicos é o gerador. Nos sistemas eólicos admite-se praticamente o recurso todo o tipo de máquina, desde as mais clássicas às mais modernas [20].

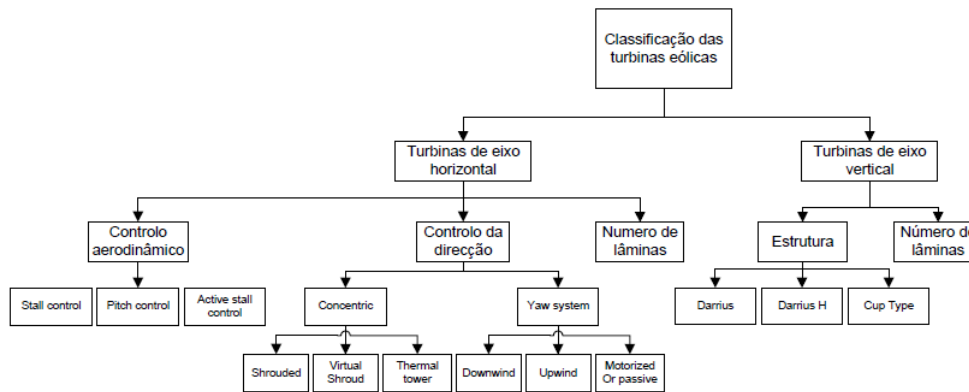


Figura 2.13: Classificação das turbinas; Fonte: [4]

- **Gerador:** Este elemento é o responsável pela conversão da energia mecânica entregue pelo rotor ao seu eixo em energia eléctrica.

Quando se procura escolher um gerador para um sistema do género, quer-se uma máquina com um ciclo de vida longo, baixa manutenção, custo de aquisição reduzido e simplicidade no uso. Depois destes requisitos serem cumpridos, poder-se-á então escolher o gerador. Temos então as máquinas de corrente contínua, máquinas síncronas convencionais, máquinas de indução e máquinas síncronas de ímanes permanentes.

As máquinas CC permitem que se despreze o uso de retificadores CA-CC, pois essa conversão é efetuada internamente por comutadores mecânicos. Este tipo de máquina deixou de ser utilizada nestes sistemas pois tem um rendimento reduzido e ao mesmo tempo requer muita manutenção, deixando de estar presentes nestes sistemas por volta de 1980 [20].

As máquinas síncronas convencionais são um mecanismo bastante consolidado no meio. Como consegue manter o valor da frequência para um dado valor de velocidade fixa, são bastante utilizadas em parques eólicos que trabalham com velocidade fixa. Apresenta porém a desvantagem de ser preciso aplicar CC para excitar o campo magnético do rotor, à semelhança do que sucede com as máquinas de corrente contínua [20].

Praticamente quase toda a potência eléctrica gerada nas indústrias é originada pelos geradores de indução. Tem um vasto leque de vantagens em relação às outras, como por exemplo a possibilidade de ser construída sem escovas e não precisar de excitação em CC. Apresenta também um custo de investimento reduzido e necessita de pouca manutenção e pode-se conseguir um elevado rendimento. Por essas razões são utilizadas quer em parques de grande potência quer em sistemas eólicos de baixa potência ou até aproveitamento hidroeléctricos de baixa potência. Este tipo de sistemas requer excitação em CA, podendo ser autoexcitados ou excitados externamente. Se esta máquina estiver ligada à rede, a excitação é efetuada pela própria rede. Dentro deste tipo de máquinas destaca-se o SQIG (*Squirrel Cage Induction Generation*), sendo esta a máquina usada neste trabalho. Na secção 3.5 será dada uma explicação mais detalhada sobre o mesmo.

As máquinas síncronas de ímãs permanentes são bastante utilizadas uma vez que trabalham perante velocidades variáveis e conseguem combater o problema das máquinas síncronas convencionais, que residia no facto de necessitar de CC para excitar o campo de excitação do rotórico. Este tipo de máquina é conhecida no meio como PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Machine*) e permite aumentar a energia capturada através do vento. Para além disso, aumenta o rendimento e diminui o ruído [20].

Depois de analisadas todas as características das máquinas descritas acima optou-se pela SQIG.

2.1.3 Características do Sistema Eólico

Os ventos têm origem na radiação solar, isto porque estes são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Como tal, há regiões mais ventosas ou menos, tendo em conta a sua posição na superfície terrestre e que implica que sejam mais ou menos quentes. Como é de esperar, as regiões polares são mais frias que as regiões tropicais, que se encontram mais próximas do sol. O ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que provém das regiões polares. O deslocamento das massas de ar determina a formação dos ventos [20].

Os ventos são mais intensos nas zonas de maior de altitude, nomeadamente acima de 1 quilómetro. No entanto ainda surgem algumas objeções à implementação de sistemas nessas condições, pois para essas alturas são necessários sistemas eólicos com diferentes características, nomeadamente ao nível das pás das turbinas, que têm que suportar forças superiores às normais. Normalmente, os sistemas eólicos estão instalados a algumas dezenas de metros de altura, sendo as suas condições de operação afetadas pela rugosidade, relevo e pelos obstáculos presentes no local de instalação [20]. Torna-se então necessário efetuar estudos sobre as condições do vento nos locais onde se pretende instalar os sistemas eólicos. Normalmente, o tempo médio necessário para avaliar um local do ponto de vista do potencial eólico anda à volta de 3 anos, sendo que para tal se recorre a anemómetros [20].

Fruto da inclinação do nosso planeta em relação ao plano da sua órbita em torno do Sol e da não uniformidade na distribuição de radiação solar recebida pela superfície terrestre, resultam variações de intensidade e duração dos ventos. O vento pode ser classificado segundo diversas classes: monções, brisas, ciclones, tufões, tornado, furacão, vendaval e *willy-willy*. Os mais frequentes são as monções e as brisas. Os primeiros são caracterizados por serem ventos periódicos que mudam de direção consoante a estação do ano. As brisas, por seu lado, são ventos periódicos de baixa intensidade e que normalmente não ultrapassam os 50 km/h. As monções podem ser previstas com alguma segurança em escalas de tempo inferiores a um ano, uma vez que apresentam variações muito lentas dependendo da estação do ano. Pelo contrário, as brisas apenas podem ser previstas numa escala temporal a rondar os dias de antecedência, uma vez que se tratam de ventos com grande variação de intensidade para intervalos de tempo curtos. Para intervalos de tempo na

ordem de alguns minutos, surgem também grandes variações de intensidade de vento normalmente chamados de turbulência.

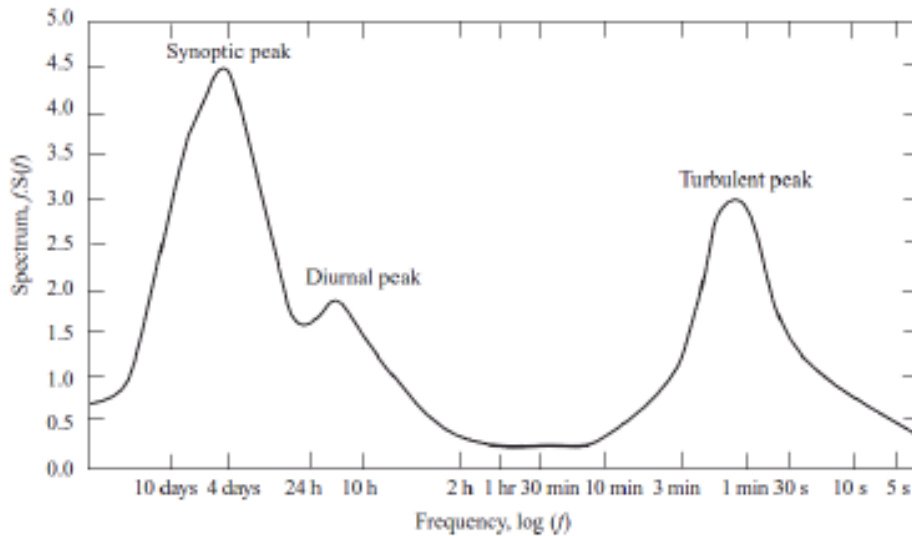


Figura 2.14: Espectro da velocidade do vento no parque eólico de *Brookhaven*; Fonte: [10]

Na figura 2.14 pode-se observar um gráfico exemplo da representação de um espectro de velocidade de vento, neste caso num parque eólico em Nova Iorque, onde é possível identificar 3 zonas distintas ao nível energético. A primeira diz respeito a períodos de tempo na ordem dos dias e está relacionada com o movimento de grandes massas de ar, também apelidada de zona macro-meteorológica (surge como *Synoptic Peak* na figura). A segunda zona é a micrometeorológica, que está associada a intervalos de tempo na ordem de segundos ou alguns minutos, relacionada a turbulência atmosférica (*Turbulente Peak*) [10]. A terceira e última zona diz respeito ao vazio espectral, que representa intervalos de tempo compreendidos entre alguns minutos e algumas horas e está relacionada com a região da figura com menos energia (*Diurnal Peak*).

Quando se fazem estudos sobre o vento e as características deste, deve-se olhar para dois aspetos fundamentais:

- 1) Variação global do vento;
- 2) Variação locais do vento;

1) Para se fazer a caracterização de um local em relação ao vento, é necessário ter medições de pelo menos três anos, em que os resultados dos estudos espelham a frequência em que ocorre uma determinada velocidade de vento. Nesses mesmos estudos é apresentado o número de vezes em que ocorre uma determinada velocidade do vento em função do número total de horas analisadas. Por vezes alguns valores dessa distribuição são extrapolados recorrendo à distribuição de *Weibull* [11]. Na figura 2.15 estão representadas duas curvas densidade probabilidade, segundo a distribuição de *Weibull*.

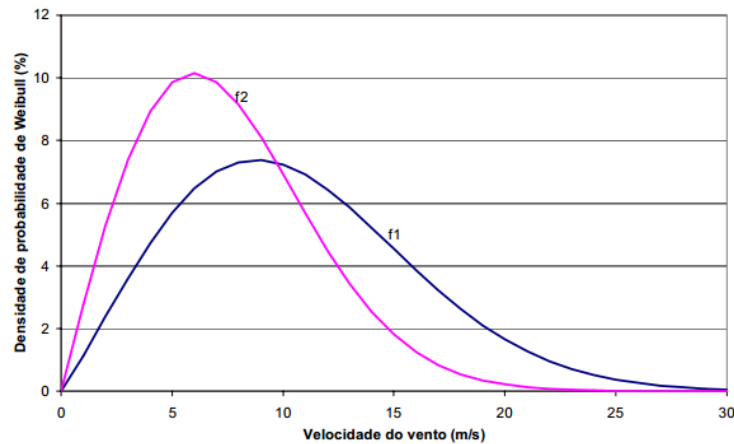


Figura 2.15: Densidade de probabilidade de *Weibull*; Fonte: [11]

A função de Weibull é descrita através da seguinte expressão:

$$F_{Weibull} = \frac{k}{c} \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]; [4] \quad (2.1)$$

K é um valor adimensional e C é um fator de escala em m/s. C e K são dimensionadas para que os valores encontrados para a função de Weibull se aproximem à frequência de ocorrência.

2) As condições climáticas e as características dos locais afetam diretamente a intensidade e direção do vento. A direção do vento tem que ver com os efeitos globais e locais do vento. Um aspecto a ter em conta é a turbulência, que consiste numa variação não linear da velocidade e da intensidade do vento, sendo que a mesma representa uma variação local. Fatores como fenômenos naturais (furacões), rugosidade elevada e a presença de obstáculos provocam turbulência ou ventos turbulentos.

Os obstáculos, sejam eles quais forem, têm influência direta na velocidade do vento, diminuindo-a. Na figura 2.16 pode-se verificar o modo como o escoamento é afetado na área envolvente a um obstáculo, podendo-se verificar que a zona de turbulência pode chegar até três vezes a altura do obstáculo, sendo mais intensa na parte de trás do que na da frente do mesmo.

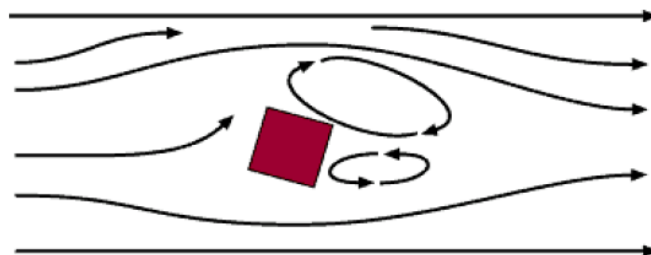


Figura 2.16: Escoamento na zona envolvente de um obstáculo; Fonte: [12]

Percebe-se então que não se deve colocar um aproveitamento de energia eólica num local sem fazer um estudo das características dos locais. O atrito entre o solo e o vento varia de local para local, isto porque a rugosidade do solo também varia, sendo que quanto maior for a rugosidade maior será o atrito e menor será a velocidade do vento. Dai se perceber o porquê de se instalarem os aproveitamentos eólicos no alto de montanhas, onde o solo é menos rugoso.

Tipo de terreno	Z_0 (m) min	Z_0 (m) max
Lama/gelo	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-5}$
Mar calmo	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Areia	$2 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}
Neve	10^{-3}	$6 \cdot 10^{-3}$
Campo de cereais	10^{-3}	10^{-2}
Relva baixa	10^{-2}	$4 \cdot 10^{-2}$
Descampados	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Relva alta	$4 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
Floresta	10^{-1}	$3 \cdot 10^{-1}$
Terreno com árvores	10^{-1}	1
Povoação dos subúrbios	1	2
Centro da cidade	1	4

Figura 2.17: Valores de rugosidade de diversos tipos de terrenos; Fonte: [10]

Normalmente, os locais com rugosidade mais elevada são aqueles onde há mais população (mais industrializados), e por outro lado o mar apresenta os índices de rugosidade mais baixa, surgindo como locais onde se poderá obter um maior rendimento energético para aproveitamentos eólicos. É por isso que, surge cada vez mais a tendência para implementar sistemas eólicos *offshore* no mar, onde se verifica um menor índice de rugosidade. Na figura 2.17 é possível visualizar valores relativos à rugosidade de diferentes tipos de terrenos.

Com vista a estimar a velocidade do vento num local com uma determinada altura e rugosidade do solo (Z_0) recorre-se normalmente à lei logarítmica de *Prandtl* [10].

Ainda no que diz respeito às características dos sistemas eólicos e no seguimento das temáticas já abordadas, importa estudar o potencial eólico de um local, isto porque a potência disponível aumenta com o cubo da velocidade do vento, pelo que a instalação de turbinas em locais com ventos fortes e persistentes é um fator determinante para o sucesso económico e energético da instalação.

A primeira fase na escolha dos locais passa um bocado pelo senso comum, isto é, apontam-se os topos montanhosos onde normalmente os ventos são intensos, os planaltos e as superfícies elevadas onde se pode ter bastante vento, assim como zonas costeiras, pelos mesmos motivos.

Os locais potencialmente interessantes podem ser identificados recorrendo a mapas adequados, como as cartas militares complementadas com visitas aos locais considerados. Se for possível ter acesso a mapas de isoventos (linhas com a mesma velocidade média anual de vento), estes podem ser usados para se ter uma primeira perceção do local onde instalar o recurso eólico. No entanto,

para se decidir onde instalar um recurso eólico é necessário ter medidas concretas sobre os índices do vento sobre os locais.

2.2 Sistemas Fotovoltaicos

2.2.1 Estado Atual e Futuro da Tecnologia

A data da primeira visualização do efeito fotovoltaico remonta a 1839 quando Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produzem uma diferença de potencial quando expostas à luz (Becquerel). Após essa primeira experiência, a evolução da energia fotovoltaica passou por uma série de experiências como por exemplo por parte de W.G.Adams e R.E.Day que utilizaram as propriedades fotocondutoras do selênio com vista a produzir o primeiro dispositivo sólido de produção de energia elétrica por exposição ao sol [33].

Em 1953 nasce a primeira célula fotovoltaica moderna, quando Calvin Fuller desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as propriedades elétricas (dopagem). Fuller produziu uma barra de silício dopado com uma pequena concentração de gálio, que o torna condutor, sendo as cargas móveis positivas (silício do “tipo p”). Com a ajuda do físico Gerald Pearson, que era seu colega nos *Bell Laboratories*, mergulhou a barra de silício dopado num banho quente de lítio, criando assim na superfície da barra uma zona com excesso de elétrons livres, ou seja, excesso de cargas negativas (“tipo n”). Sendo assim, nas zonas onde o silício de “tipo p” entre em contacto com o silício de “tipo n”, forma-se uma junção do “tipo p-n”, surgindo um campo elétrico permanente nessa mesma zona. Ao caracterizar eletricamente esta amostra, Pearson verificou que produzia uma corrente elétrica quando a amostra era exposta à luz, surgindo ai a primeira célula solar de silício. Este foi o primeiro grande passo para o desenvolvimento do aproveitamento da energia solar [34].

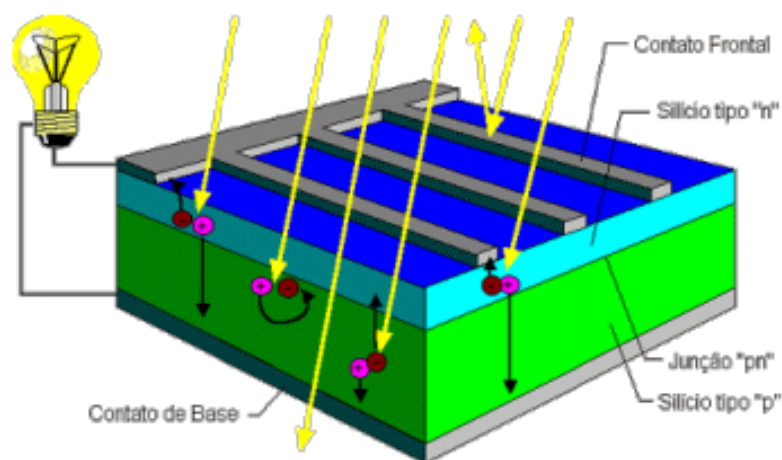


Figura 2.18: Princípio de funcionamento dos painéis solares;Fonte: [13]

No ano de 1955 e após múltiplas experiencias com células solares, Pearson, Fuller e Chapin (que outrora investigara também formas de produção de energia elétrica através da radiação solar de forma independente), uniram os esforços e aplicaram os princípios que estudar por forma a conseguir alimentar uma rede telefónica local, em Americus, no estado da Georgia. Os testes do painel instalado ocorrem entre outubro de 1955 e março de 1956 e os resultados foram promissores. No entanto, na altura percebeu-se que a implementação destes sistemas implicaria sempre um investimento muito avultado e que só se justificaria a aplicação destes sistemas em casos muito especiais, como por exemplo a produção de energia elétrica no espaço, nomeadamente como forma de alimentar os satélites no espaço. O facto de estes sistemas passarem a ser utilizados em ambiente espacial fez com que o interesse sobre a área aumentasse exponencialmente e como tal avanços nessa tecnologia começaram a acontecer mais frequentemente [34].

De evolução em evolução foi-se avançando na descoberta de melhores soluções e melhores modos de funcionamento dos sistemas fotovoltaicos chegando assim ao panorama atual em que se encontra esta tecnologia.

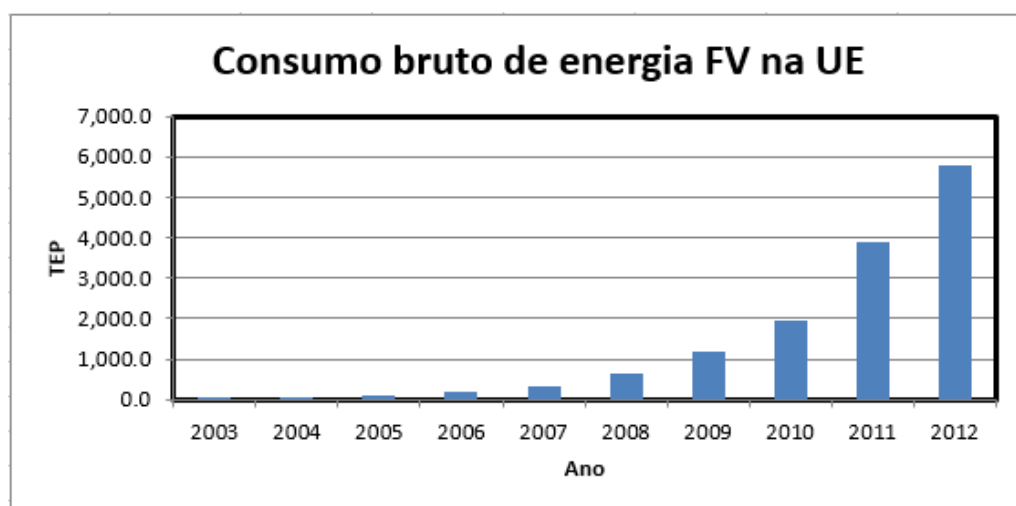


Figura 2.19: Evolução dos consumos FV na UE; Dados: [14]

Hoje em dia, a indústria do FV é uma indústria crescida, com um vasto leque de empresas especializadas na prestação deste tipo de serviços, o que faz com que do ponto de vista do consumidor esta área seja cada vez mais apetecível. Do ponto de vista ambiental, o facto de se tratar de uma energia limpa faz com que tenha bastantes seguidores, principalmente aqueles que se preocupam com o futuro do nosso planeta e com as gerações futuras que nele habitarão. Para além dos fatores ambientais, a produção de energia solar por parte dos microprodutores é em muitos casos comparticipada pelos governos dos países ou até pelas entidades reguladoras energéticas, por forma a impulsionar a microprodução.

O facto do preço dos painéis estarem a baixar proporcionalmente com o número de painéis instalados, aliado ao crescimento de mercado (30% por cento ao ano), faz com que a energia fotovoltaica se apresente cada vez mais como um ramo a investir. Segundo o EPSI (*European*

Photovoltaic Industry Association) em 2020 a energia fotovoltaica representará 1% da energia elétrica a nível mundial e em 2040 representará 26% [34].

Na figura 2.19 é possível observar a evolução do mercado do FV. Apesar do custo da energia FV estar a baixar, verifica-se que esta redução não tem acompanhando o crescimento do mercado dos FV, algo que não é positivo.

2.2.2 Estrutura/Tecnologias dos Sistemas FV

Quando se fala em energia fotovoltaica costuma-se associar imediatamente esta aos painéis fotovoltaicos. No entanto um sistema FV não se resume aos painéis, que por si só não representa qualquer tipo de ganho quando se pretende produzir energia elétrica aproveitando a energia solar. Nesta secção será dada uma explicação sobre os principais componentes que constituem um sistema fotovoltaico, para além dos painéis FV e que viabilizam esta forma de produção de EE que cada vez mais se impõe nos mercados energéticos ao nível mundial. Na figura 2.20 está representada a configuração de um sistema FV tipo.

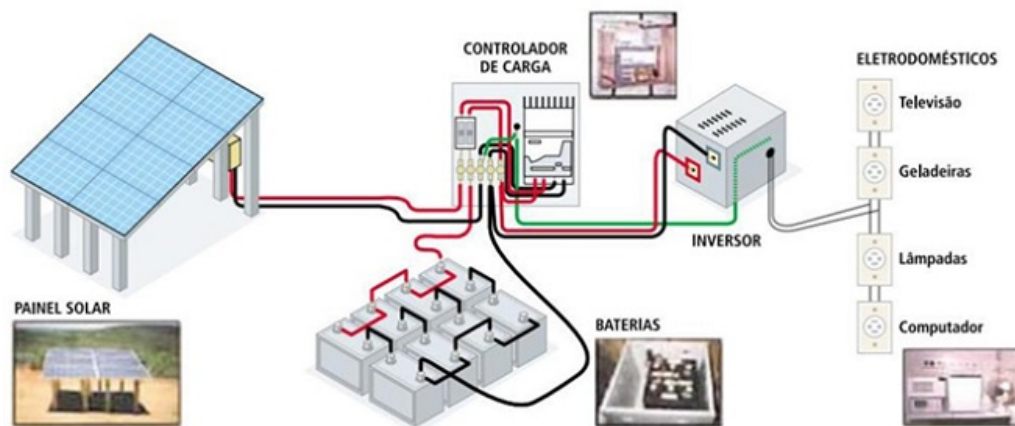


Figura 2.20: Constituição de um sistema FV tipo; Fonte: [15]

2.2.2.1 Painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos consistem em conjuntos integrados e interligados de células FV [35]. Tratam-se de dispositivos que conseguem gerar uma potência limitada, pelo que para se produzir uma elevada capacidade de potência é necessário instalar um grande conjunto de painéis. Assim como já foi mencionado anteriormente ref(cap.panorama mundial), os sistemas FV são utilizados como fonte de energia de satélites ou naves espaciais ou, podem estar ou não ligados à rede elétrica. Os painéis FV utilizam luz, sob a forma de partículas (fotões), para gerar corrente elétrica através do efeito fotovoltaico, referido anteriormente no capítulo 2.1.1. São constituídos normalmente por um dispositivo condutor semelhante a um díodo de junção de semicondutor, sendo que este é composto por várias camadas de diferentes materiais [35]. Na maioria dos casos, recorre-se às

células de silício cristalino à base de wafers, ou células de película fina de telureto de cádmio ou silício [35]. O seu funcionamento assenta na experiência mencionada na secção 2.2.1. O facto de o silício ser o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre faz com que a tecnologia FV seja ainda mais cativante.

Quanto aos tipos de módulos FV, sabe-se que atualmente a maior parte dos módulos são rígidos, no entanto existem modelos do tipo flexível, que são à base de células de película fina. As suas ligações elétricas são feitas em série com o intuito de se obter a tensão pretendida à saída e ou em paralelo de forma a fornecer a quantidade de fonte de corrente pretendida [35]. Os painéis possuem também díodos por forma a evitar o sobreaquecimento das células em caso de sombra parcial, isto porque o aquecimento reduz a eficiência do funcionamento de um sistema FV. Hoje em dia, surgem ainda poucas formas de colmatar o aquecimento dos painéis porém, os instaladores de painéis têm como costume definir uma área de ventilação para os mesmos, situada normalmente por detrás deles. Os módulos mais recentes apresentam sistemas concentradores, nos quais a luz solar é concentrada por um conjunto de lentes ou espelhos sobre uma série de células de pequenas dimensões, o que faz com que seja possível o uso de células com elevado custo por unidade de área, tais como as de arseneto de gálio, de forma mais eficiente [35]. O modelo mais rudimentar de uma célula de solar consiste numa fonte de corrente e um díodo em paralelo, em que o díodo representa a junção “p-n” numa célula solar.

No que diz respeito à instalação dos módulos, e com o intuito de usar adequadamente as suas células, estes precisam de estar ligados uns aos outros e ao resto do sistema, de estar protegidos de impactos mecânicos durante o seu fabrico, transporte, instalação e uso e necessitam também de estar protegidos em relação à humidade, uma vez que esta danifica severamente os equipamentos do ponto de vista das ligações e contactos nos mesmos.

No que se refere à eficiência dos painéis, sabe-se que consoante a sua construção, os painéis podem cobrir uma grande gama de frequências da radiação solar mas não são capazes de aproveitar todo o espectro solar, nomeadamente os IV, UV e a luz baixa ou difusa). Por essa razão, grande parte da radiação solar que incide nos FV é desperdiçada, apesar de estes obterem uma eficiência muito elevada quando expostos a luz monocromática. Uma tendência para o futuro dos FV consiste em “dividir” a luz solar em diferentes comprimentos de onda, direcionando luz de diferentes comprimentos de onda para células sensíveis a esses mesmos comprimentos de onda. A adoção deste tipo de sistema permitiria aumentar o rendimento dos painéis em 50%. Por outro lado, o uso de células sensíveis às radiações IV permitiria aproveitar energia durante a noite, tornando-se ainda mais eficiente. Atualmente, o rendimento dos módulos varia entre os 5% e os 21.5% para produtos comerciais, sendo que estes valores normalmente são inferiores à eficiência de cada uma das células que os constituem. A eficiência de um sistema fotovoltaico depende da eficiência dos vários equipamentos que constituem o sistema, da forma como estão interligados e da carga que se pretende alimentar. Na figura 2.21 é possível verificar a evolução da eficiência dos painéis.

Quanto às perdas e rendimento, sabe-se que o rendimento de um painel depende da radiação solar, sujidade, temperatura e tensão do próprio painel. Normalmente o valor nominal do rendimento é fornecido pelo fabricante, mas em caso contrário pode ser deduzida pela potência de pico

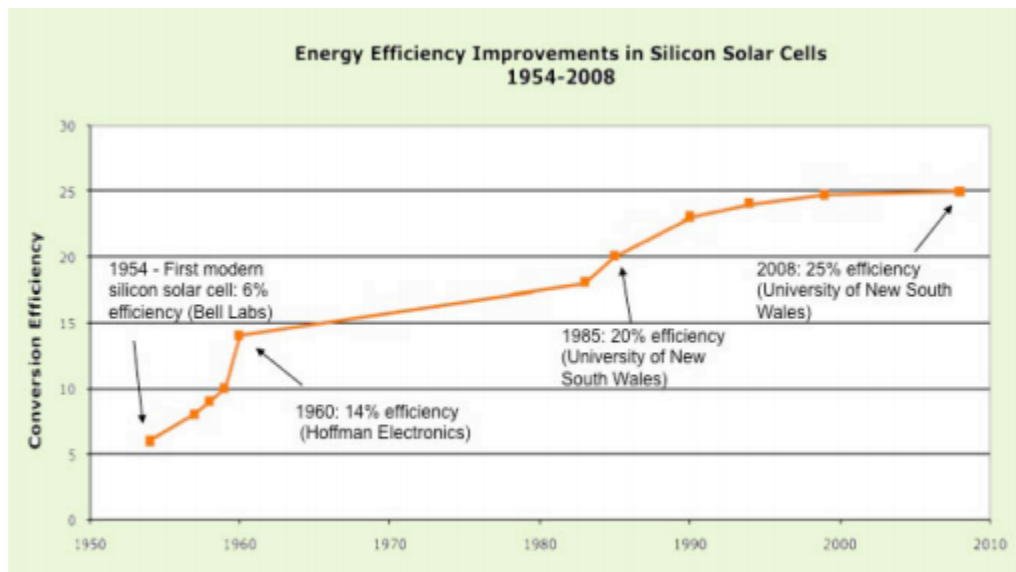


Figura 2.21: Evolução da eficiência do FV ao longo dos anos; Fonte: [16]

e da área do painel (eq), sendo que a potência de pico é aquela que o painel consegue debitar em condições (standard).

$$h_p = \frac{100 \times \frac{P_p}{A}}{1000} \quad (2.2)$$

- h_p é o rendimento do painel em %;
- P_p é a potência de pico do painel em [kWp];
- A é a área do painel em m^2 .

O rendimento e a potência de pico devem ser calculadas para as condições STC, radiância com valor $1kW/m^2$ e uma temperatura referência de 25° .

Outro aspeto que permite caracterizar os módulos fotovoltaicos é o índice de performance (*Performance Ratio*), que serve para avaliar o sistema em duas vertentes distintas: a primeira refere-se aos rendimentos das fontes de energia e considera-se que o sistema funciona a 100% sendo independente da carga do sistema. Sendo assim, considera-se que o melhor rendimento é aquele que corresponde apenas ao rendimento dos geradores, não considerando qualquer outro componente do sistema FV, desprezando as perdas nas baterias ou inversores [35]. Assim sendo a energia produzida nas fontes de energia será o seguinte:

$$E_{fonte} = E_{saida} \times h_p \times A \quad (2.3)$$

- E_{fonte} é a energia produzida pela fonte de energia [kW/ano];
- E_{saida} é a energia de saída do painel [$kWh/m^2/ano$];

- A é a área do painel em m^2 .

Ainda no seguimento da estrutura dos sistemas FV, importa abordar os inversores de corrente, os controladores de carga e as baterias, podendo-se referir também os sistemas de apoio (figura 2.20).

2.2.2.2 Inversores

Os inversores são dispositivos utilizados para fazer a ligação entre o gerador fotovoltaico e a carga AC ou a rede (AC). Têm o objetivo de converter o sinal elétrico DC proveniente do gerador fotovoltaico num sinal AC, sendo que, numa fase posterior, ajusta o sinal para a frequência e nível de tensão da rede à qual está ligado. É importante ter em conta se os inversores são de ligação à rede ou se são do tipo autónomo.

Os inversores de rede são ligados diretamente à rede elétrica ou através da instalação de serviço elétrico do prédio. Quando a ligação é direta, a eletricidade produzida é injetada diretamente na rede pública. Se for feita a ligação através da instalação de serviço do prédio, a energia gerada é consumida numa primeira instância pela habitação e a energia não consumida é vendida à rede. Este tipo de inversores de rede podem ser divididos em classes, sendo elas os inversores comutados pela rede e os inversores autocontrolados [36].

- Comutados pela rede: o seu funcionamento é baseado em tirístores e o seu campo de aplicação diz respeito a grandes parques de sistemas fotovoltaicos. São controlados pelo “clock” da rede e este tipo de mecanismo não é indicado para sistemas isolados onde as cargas sejam puramente resistivas [36];
- Autocontrolados: funcionam com base na tecnologia dos MOSFET, GTO, IGBT. Têm a possibilidade de possuir transformador de alta ou baixa frequência à saída dos inversores. O transformador assegura a proteção contra contactos indiretos, eliminando assim a necessidade de recorrer a proteções diferenciais. Este tipo de sistemas são utilizados para instalações de grandes ou pequenas dimensões/isoladas. Não requerem muita energia reativa para o seu funcionamento [36].

Os inversores autónomos são caracterizados por possibilitar a utilização de aparelhos convencionais AC de 230V e 50 Hz alimentados pela rede sob a forma de corrente alternada (AC) [36]. Este tipo de inversor deve ser capaz de alimentar um elevado número de equipamentos elétricos. A qualidade do inversor autónomo depende de um conjunto de características, como por exemplo:

- Corrente alternada sinusoidal, com tensão e frequência estabilizadas;
- Eficiente na conversão;
- Elevada tolerância às correntes de arranque;
- Elevada tolerância perante as flutuações de tensão na bateria;

- Baixo consumo em *Stand-by*, com auto deteção da presença de uma carga;
- Proteção dos curto-circuitos do lado da saída;
- Elevada compatibilidade eletromagnética;
- Baixo conteúdo harmónico;
- Proteção contra sobreintensidades.

A conjugação destes sistemas com um sistema de armazenamento de energia eléctrica é extremamente importante dada a variabilidade da produção associado aos painéis. Também para os acumuladores/baterias existem vários tipos de sistemas.

2.2.2.3 Baterias

Sabendo que a energia produzida através de sistemas fotovoltaicos e a energia consumida não coincidem ao longo do dia, é necessário olhar para os sistemas de armazenamento de energia como um aspeto fulcral na elaboração de um projeto do género. A energia armazenada ao longo do dia pode ser usada nos períodos noturnos, ou quando for necessário satisfazer um aumento inesperado de carga. Para possibilitar o armazenamento, recorre-se normalmente a baterias de ácido de chumbo ou a baterias recarregáveis, isto para armazenamentos de curta duração. Estas baterias têm boas características no que diz respeito à relação qualidade/preço e podem assegurar quer correntes de carga elevadas quer correntes de carga baixa, consoante o pretendido. Começam também a surgir baterias de níquel-cádmio, hidreto metálico e de iões de lítio [36].

Existem vários tipos de acumuladores, como por exemplo [36]:

- Baterias húmidas;
- Baterias de gel;
- Baterias estacionárias com placas tubulares;
- Baterias de bloco com placas positivas planas.

Para classificar um acumulador, tem-se em atenção algumas características, sendo elas[36]:

- Capacidade;
- Tempo de descarga;
- Tensão;
- Energia específica;
- Densidade específica;

- Densidade de potência;
- Ciclos de vida;
- Auto-Descarga;
- Profundidade de descarga;
- Rendimento energético.

De todas as características apresentadas, destaca-se a capacidade, que corresponde à máxima energia elétrica que a bateria pode fornecer durante o seu processo de descarga e até a descarga estar completa, e perante umas dadas condições de descarga. A capacidade nominal de uma bateria é dada pela equação 2.4:

$$C = I_n \times T_n \quad (2.4)$$

- I_n é a descarga constante [A];
- T_n é o tempo de descarga [h].

No que diz respeito à tensão, normalmente o seu valor é 12 V, sob a forma de 6 baterias em série, ou 24 V com 12 células em série, isto para as baterias de ácido de chumbo (referência na área).

O ciclo de vida de uma bateria corresponde ao número de vezes que a bateria pode carregar/descarregar durante a sua vida útil [36].

Outro aspecto característico das baterias é a auto-descarga, que representa a percentagem de descarga da bateria mesmo quando não é utilizada [36]. Acaba por representar uma descarga "natural".

Normalmente, uma bateria de ácido de chumbo apresentam um número de ciclos na ordem dos 100 a 800, que equivale a um período entre 3 e 8 anos [36]. Para baterias estacionárias, tempo de vida útil é entre 10 e 15 anos.

Fatores ambientais como o vento, chuva e neve não podem ser ignorados na projeção e dimensionamento de um sistema fotovoltaico, pois os esforços efetuados por estes nos próprios painéis afetam o rendimento do sistema. O dimensionamento do sistema fotovoltaico varia de acordo com o tipo de sistema (interligado com a rede ou autónomo).

2.2.2.4 Reguladores de carga

Os reguladores de carga assumem uma elevada importância nos sistemas fotovoltaicos, isto porque são estes que são responsáveis por controlar a carga nas baterias/acumuladores através da análise da tensão na mesma, sendo que também são responsáveis por interromper o fornecimento às cargas externas isto quando se atinge o nível de descarga máxima da bateria. O mesmo acontece quando se atinge o nível máximo de carga da bateria. Por esta razão, sabe-se que o ciclo de vida

útil das baterias está intimamente ligado com o bom funcionamento dos reguladores. Cabe aos reguladores fazer um conjunto de tarefas, sendo as principais as seguintes:

- Garantir ótima carga nos acumuladores;
- Informação do estado da carga nos acumuladores;
- Proteção contra sobrecargas;
- Proteção contra profundas descargas;
- Proteção contra descargas indesejáveis.

Existem três grandes tipos de reguladores, sendo eles os reguladores em série, paralelo e os MPP (*Maximum Power Point*).

Nos reguladores série, os interruptores eletrônicos responsáveis pelo controle estão em série com o gerador fotovoltaico. Fazem o controle da carga da bateria por análise da tensão na mesma e interrompem o fornecimento às cargas quando a profundidade de descarga máxima é atingida. O princípio de funcionamento deste regulador consiste em interromper a entrega de potência do módulo, através de um relé ou de um semicondutor quando se verifica o aparecimento da tensão máxima de carga, fechando o circuito novamente quando ocorre um decréscimo do valor da tensão para níveis aceitáveis. No entanto, as sucessivas oscilações “On-Off” provocam também variações do valor da tensão em torno do valor da tensão máxima de carga, assim como perdas energéticas, o que levou a que se desenvolvessem reguladores de regulação constante para evitar o surgimento dessas perdas em reguladores série [36].

No caso dos reguladores em paralelo, estes são caracterizados pela colocação de um dos interruptores eletrônicos de controle em paralelo com o gerador fotovoltaico. Estes reguladores controlam a carga da bateria através da aplicação de um curto-circuito momentâneo ao gerador fotovoltaico. Este tipo de reguladores permitem que seja reduzida continuamente a potência do módulo, desde que é atingida a tensão máxima de carga na bateria. A energia que não é aproveitada é libertada sob a forma de calor, permitindo assim que os módulos possam suportar as correntes de curto-circuito sem problema, sofrendo apenas um aquecimento de temperatura adicional. Este tipo de regulador permite o curto-circuito do regulador à noite, evitando assim correntes inversas no mesmo. Este tipo de método é o ideal para uma bateria uma vez que contribui para uma melhor eficiência da mesma [36].

Os reguladores MPP têm um problema que ocorre no caso da tensão do gerador baixar. Nesse caso (diminuição da radiação solar no gerador, por exemplo), os reguladores poderão não permitir o aproveitamento da energia em produção no gerador fotovoltaico, uma vez que o abaixamento da tensão e o deslocamento do ponto ótimo de funcionamento à máxima potência (MPP) ficam fora do alcance do próprio regulador. Com o objetivo de continuar a aproveitar essa energia, surge a necessidade de ter um regulador que estabeleça o funcionamento do sistema no MPP, mantendo assim a tensão com valor superior ao da bateria para que esta carregue [36].

2.2.3 Características do FV

Quando se faz um projeto que inclua sistemas fotovoltaico, como é o caso, importa ter em conta uma série de fatores que nos levam a ter uma melhor percepção sobre o modo de funcionamento dos sistemas. Neste caso, para sistemas FV, é preciso ter em atenção as curvas características dos painéis, de potência-tensão e corrente-tensão, bem como alguns aspetos que podem alterar a produção dos painéis, como é o caso da temperatura, radiação, inclinação e o sombreamento [17]. As referidas curvas são função do tipo de módulo fotovoltaico e normalmente são fornecidas pelo fabricante dos painéis.

Na figura abaixo surge o circuito equivalente de um módulo FV real, sendo que após a imagem serão descritas as equações que traduzem o desempenho dos geradores fotovoltaicos, relacionado a tensão, corrente, temperatura e irradiação solar [18].

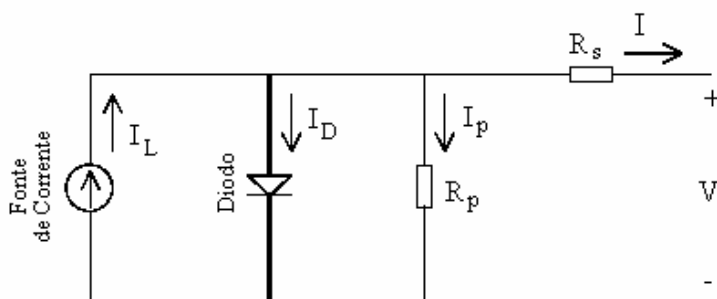


Figura 2.22: Esquema elétrico de um módulo FV; Fonte: [17]

$$V = \frac{AkT_{ref}}{e} \ln \left(\frac{I_{fv} + I_D - I}{I_0} \right) - R_s * I_0 \quad [37] \quad (2.5)$$

$$I = IL - I_d - I_p \quad (2.6)$$

$$I_L = I_{sc0} \cdot \frac{S}{S_0} + C_t \cdot (T - T_{ref}) \quad (2.7)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV_d}{AkT}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

$$I_0 = I_{s0} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (2.9)$$

$$i_r = \frac{V_d}{R_p} \quad (2.10)$$

$$V_d = \frac{V}{N_s} + I \cdot R_s \quad (2.11)$$

$$T = T_a + K_s \cdot S \quad (2.12)$$

Onde:

- I_L é corrente à saída do painel fv (A);
- I_D é corrente que passa no díodo (A);
- I_D é corrente que passa na resistência shunt R_p (A);
- N_s é o número de células;
- I_{sc0} é a corrente de curto circuito de cada célula (A) à temperatura referência;
- S_0 é a intensidade luminosa nas condições de teste habituais (aproximadamente $1000w/m^2$);
- T_{ref} é a temperatura de referência (normalmente $25^\circ C$)
- T é a temperatura da célula;
- R_s é a resistência série de cada célula solar em Ω
- R_{sh} é a resistência shunt de cada célula solar em Ω
- I_{sc0} é a corrente de saturação do díodo de cada célula (A) à temperatura referência;
- E_g é a banda de energia de cada célula solar em eV. É cerca de 1.12 para o silício cristalino e 1.75 para o silício amorfo.
- "A" é o coeficiente de emissão ou fator de idealidade uma célula solar. É cerca de 2 para silício cristalino e 1 para o amorfo.
- C_t é o coeficiente de temperatura em $A/^\circ C$
- K_s define como é que a luz solar afeta a temperatura da célula.
- q é a carga de um eletrão, $q = 1.6 \times 10^{-19}C$
- k é a constante de Boltzmann $1.8806 \times 10^{-23}(Wm^{-2}K^{-4})$
- V_d é a tensão no díodo
- T_a é temperatura ambiente

No que diz respeito às curvas características dos painéis fotovoltaicos (P/U e I/U), a análise das mesmas é extremamente importante para se perceber a maneira correta de usar os equipamentos. Nas figuras abaixo estão representadas as referidas curvas características, que podem ser associadas a um painel FV tipo.

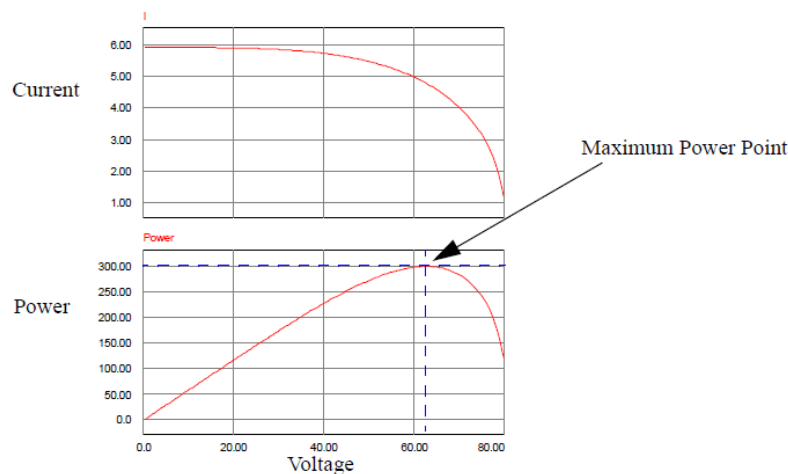


Figura 2.23: Curvas de Corrente-Tensão e Potência-Tensão de um painel fotovoltaico; Fonte: [18]

Olhando para as curvas acima facilmente se percebe que o ponto de potência máxima para o sistema se encontra à volta dos 62V. Ora, para esse valor de tensão corresponde um valor de corrente de cerca de 5A. São portanto essas as condições de funcionamento ótimas para o sistema FV, para as condições normais.

Quanto aos efeitos que podem alterar as condições de funcionamento de um painel FV, surgem por exemplo o efeito da radiação e da temperatura. Este fenómeno requer um estudo profundo uma vez que a potência que um painel produz depende fortemente da radiação que nele incide, uma vez que corrente do painel depende diretamente da radiação que nele incide. Por seu lado e como é expectável, a temperatura do painel também depende diretamente da radiação solar, isto porque parte da radiação que atinge o painel não é transformada em energia mas sim dissipada sob a forma de calor. Usualmente, os módulos FV apresentam um decréscimo de produção na ordem dos 0.5% por cada grau centígrado. Ora, sabendo que a temperatura de um painel é, geralmente, 20°C superior à temperatura registada num termómetro, importa então instalar o painel em zonas ideais no que toca à temperatura, ou seja, em locais onde haja circulação de correntes de ar que permitam arrefecer o painel. Abaixo surge uma figura 2.24 onde é possível verificar o efeito da radiação solar sob a corrente de uma célula FV [19].

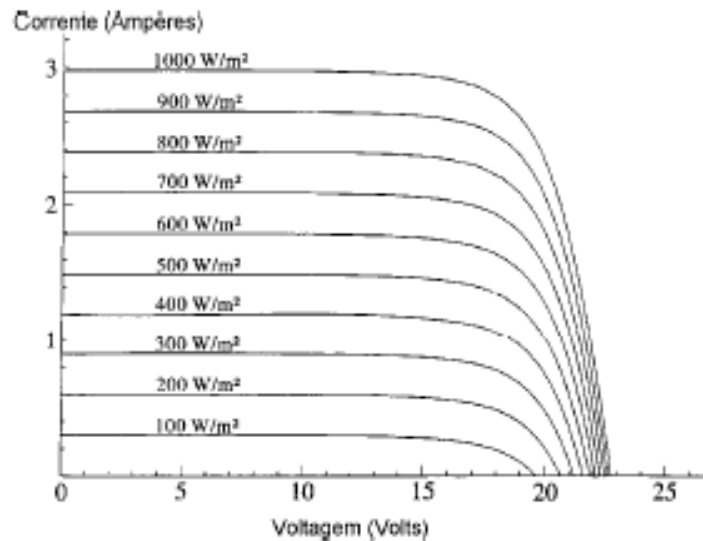


Figura 2.24: Curvas de Corrente-Tensão para diferente tipos de radiação ; Fonte: [19]

Como se pode verificar na imagem acima, para diferentes graus de irradiância, obtêm-se diferentes valores de correntes, sendo que quando aumenta a irradiância aumenta também a corrente. Quanto à temperatura, e como complemento à informação previamente descrita, pode se ver na tabela abaixo a evolução da eficiência e das perdas à medida que a temperatura aumenta.

Tabela 2.1: Relação entre a temperatura, eficiência e perdas numa célula FV - Fonte: [30]

Temperatura	Eficiência(%)	Perdas (%)
30	0.118	2.00
40	0.113	6.00
50	0.108	10.00
60	0.103	14.00
70	0.098	18.00

No que se refere à inclinação dos painéis, importa perceber de que maneira é que a mesma influência a potência de saída do próprio painel. Sabe-se que a potência produzida por um painel é função do ângulo de inclinação deste relativamente ao plano horizontal e também da orientação do painel, sendo que quanto melhor for a parametrização destes maior será a potência produzida pelo painel.

Na figura 2.25 pode se ver os tipos de inclinação sugeridas para diferentes épocas do ano, sabendo que a energia solar captada pelo painel é máxima quando este se encontra na perpendicular à direção da radiação incidente.

Normalmente, os sistemas solares estão projetados de forma a aproveitar da melhor forma a radiação no mês em que há menor insolação. Segundo esta regra, a forma de descobrir a inclinação

ótima para um local é obtida somando 10 graus à latitude do local. Com o objetivo de maximizar a produção FV, usa-se normalmente dispositivos seguidores do sol, alterando a inclinação do painel ao longo do dia, garantindo assim uma melhoria na ordem dos 30% no que diz respeito à potência produzida, quando comparado com sistemas que não possuem esses aparelhos.

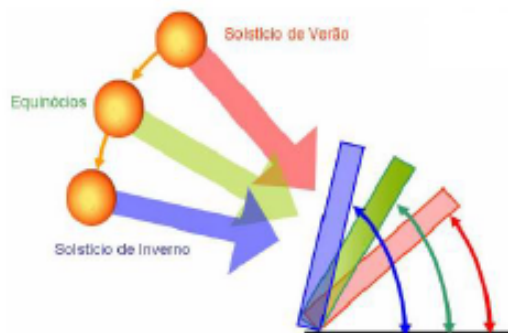


Figura 2.25: Inclinação ótima para diferentes épocas do ano ; Fonte: [19]

Outro aspeto importante associado aos painéis FV é o sombreamento. Este fenómeno é relevante uma vez que pode alterar significativamente a potência de um painel. Por exemplo, se parte do painel ficar sob sombra, a potência à saída do painel diminui e o painel pode até danificar-se uma vez que como as células estão ligadas em série entre si e deveriam ter a mesma corrente. Se uma célula está bloqueada, passa a consumir energia em vez de produzir ficando inversamente polarizada [19].

2.3 Mercados de Energia

Segundo o contexto económico atual e olhando também para os problemas ambientais que afetam o nosso planeta, faz todo o sentido apostar nas energias renováveis. Neste caso concreto, as energias eólica e fotovoltaicas surgem como alternativas altamente competentes, pois para além de serem alternativas vantajosas ao nível ambiental, comportam também uma vertente económica altamente positiva.

Fruto das vantagens que advêm do recurso a estas fontes de energia, a energia FV e a energia eólica apresentam índices altamente positivos no que diz respeito à sua evolução, como se pode ver na figura, onde se pode visualizar a evolução dos consumos de energia eólica e solar, neste caso concreto para Portugal (fig: 2.26). No panorama europeu, os indicadores sobre a percentagem de ER no consumo global energético demonstram essa mesma tendência. Na figura 2.27 está ilustrada a evolução das energias renováveis, no que diz respeito aos consumos energéticos, em Portugal e na UE.

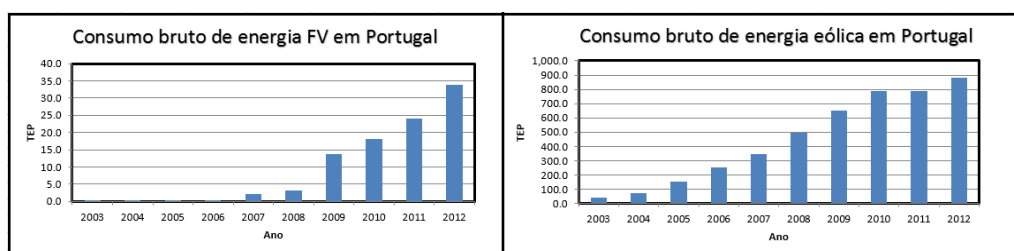


Figura 2.26: Evolução da eficiência do FV ao longo dos anos; Fonte: [14]

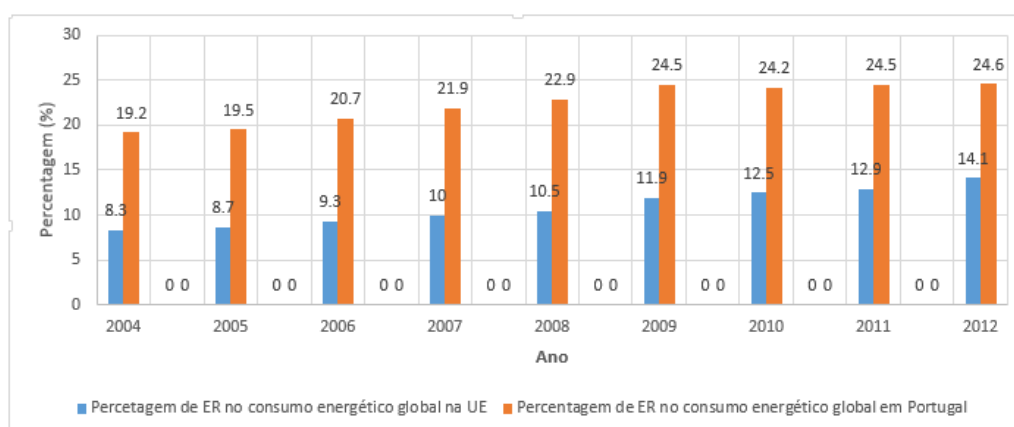


Figura 2.27: Percentagem de ER no consumo global energético em Portugal e na UE; Fonte: [14]

Quanto aos obstáculos à implementação destes sistemas renováveis, o principal consiste nos processos administrativos de registo e licenciamento dos projetos e na potência e quantidade limitada de locais de interligação de ligação à rede elétrica nacional (REN) em Portugal.

Segundo dados do DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia), no ano móvel terminado em março de 2014, o peso da energia elétrica renovável foi de 62.3% relativamente à produção bruta juntamente com o saldo importador, o que representa uma grande fatia da produção elétrica total em Portugal. No entanto e para esse mês verificou-se um decréscimo de produção renovável de 1.3% principalmente à queda de produção eólica, devido às condições climáticas. Também para o mês em questão, verificou-se um aumento de 7 e 11 MW de capacidade instalada eólica e fotovoltaica respetivamente. Ainda para Março de 2014 [38], Portugal apresenta uma produção anual de 501 GWh de energia FV e 12536 GWh de energia eólica isto tendo em conta uma potência instalada de 320 MW de FV e 4754 MW de eólica, representando estas uma parcela de 2.82 e 41.85% em relação à produção renovável total.

Virando a atenção para a microprodução, verifica-se que a tendência dos mercados é para que esta evolua positivamente, um pouco à margem do que se tem vindo a passar na área ao longo dos últimos anos. Até ao ano de 2009 não havia registos de microprodução eólica, pelo menos significativa, no entanto, para o ano 2009 há registo de 386 MWh de energia anual proveniente da microprodução eólica e este indicador tem vindo a aumentar [38]. Para a microprodução FV e

segundo os registos da DGE, verifica-se que desde 2008 até março de 2014 o valor da produção aumentou drasticamente, passando dos 7120 MWh para os 146361 MWh [38].

No entanto, ainda há muito trabalho a fazer nesta área em Portugal, faltando por exemplo mais subsídios para os microprodutores com vista a impulsionar o investimento na área. Ao nível da produção em grande escala, Portugal apresenta-se como uma potência, principalmente no que se refere à energia eólica, aproveitando o potencial eólico que dispõe. Porém, zonas como centrais e do nordeste do país, nomeadamente Santarém, Lisboa, Guarda, Coimbra e etc.

Quanto às tarifas associadas à energia eólica e à energia FV, estas vêm sendo atualizadas todos os anos, no entanto e tendo como referências os valores das tarifas para o ano de 2012, as tarifas são bastante atraentes. O plano é o seguinte: existem dois tipos de tarifários, o regime bonificado e o regime geral. No regime geral o preço da compra de energia é igual ao preço da venda. Quanto ao regime bonificado, o produtor vende a energia que produz a um preço muito mais elevado do que o preço que compra a energia. Esta tarifa é garantida para 15 anos e é remunerada de acordo com a tarifa de referência que vigorar à data da atribuição do certificado de exploração da unidade de microgeração de energia, sendo que após os 15 anos, o produtor é transferido para o regime geral. Segundo a EDP, essas instalações poderão ter até 3.68 kW [39]. Para além da potência, surgem outros requisitos a cumprir, nomeadamente:

- A unidade de microprodução utilize fonte de energia solar, eólica, hídrica, co-geração a biomassa, pilhas de combustível com base em hidrogénio proveniente de microprodução renovável ou cogeração não renovável;
- A instalação terão que ser constituídas por 2 metros quadrados de área útil, no mínimo.

A tarifa de venda em regime bonificado para 2012 era 0.326 euros por kWh nos primeiros oito anos, passando para 0.185 euros por kWh nos anos seguintes [40]. Estes valores são muito superiores aos preços de compra de energia à rede elétrica, à volta dos 0.15 euros kWh [41]. No que se refere a benefícios fiscais previstos benefícios fiscais no IRS. São dedutíveis à coleta, desde que não suscetíveis de serem considerados custos na categoria B, 30% das importâncias despendidas com a aquisição de equipamentos solares novos, com o limite máximo de 796 €.

2.4 Previsões de produção e carga

Hoje em dia, com vista a otimizar o setor de energia, recorre-se aos modelos de previsão. As previsões podem ser de dois tipos, sendo a primeira a previsão de consumos e a segunda de produção. A previsão dos consumos refere-se a uma estimativa do diagrama de cargas de uma instalação, neste caso uma moradia unifamiliar. Esta previsão faz-se com o intuito de prever depois qual a potência a disponibilizar por parte do sistema produtor com vista a alimentar esse mesmo diagrama. A título de exemplo, se uma previsão dos consumos numa determinada localização apontar para os 10 MW num dado instante, o sistema produtor não terá que produzir por exemplo 20 MW, pois esse local não precisará de tanta potência. Como é óbvio, tudo depende da qualidade

das previsões e do tipo de previsão que se faz, podendo estas ser a curto, médio ou longo prazo. Previsões a longo prazo terão sempre uma incerteza elevada associada, comparativamente com as previsões de curto prazo.

No que se refere à previsão de produção e tendo em conta aquilo que foi feito neste trabalho, estas servem para saber qual a produção esperada para um sistema num dado instante, tendo como base para essa previsão dados históricos sobre variáveis de entrada do sistema e os *outputs* do mesmo. Neste caso concreto de estudo, fez-se a previsão da produção eólica segundo dados históricos de velocidade do vento e direção do mesmo, bem como da produção efetiva (que serve como *target*). O método de previsão utilizado foram as Redes Neurais, abordadas mais à frente neste documento.

2.5 Maximum Power Point Tracker (MPPT)

Como produtores de energia, interessa obter o rendimento máximo para os sistemas de produção sejam quais forem as condições de funcionamento dos mesmos. O sistema considerado para este projeto é instável do ponto de vista das suas condições de funcionamento, isto porque quer o sistema fotovoltaico quer o sistema eólico têm como variáveis de entrada ou de controlo grandezas variáveis.

Especificamente falando do FV, sistema no qual se irá aplicar o MPPT, o sistema tem como variáveis de entrada a temperatura e a intensidade luminosa. Estas grandezas variam ao longo do dia e as condições de funcionamento do sistema fotovoltaico variam da mesma forma o que faz com que a potência à saída do painel varie constantemente. Mais à frente neste documento será demonstrado o controlo MPPT no sistema FV, com os resultados associados ao mesmo.

Quanto ao modelo do sistema eólico simulado em PSIM, não se aplicou o algoritmo do MPPT assumindo-se que o coeficiente de potência (C_p) é unitário o que não é verdade, conforme é demonstrado no capítulo 3.

2.6 Conversores

Os circuitos elétricos têm vindo a evoluir com o passar dos anos e as necessidades exigidas aos mesmos também, quer ao nível da potência, quer ao nível da eficiência. É nesse contexto que entram os conversores, que servem para ajustar os circuitos às necessidades exigidas à saída dos mesmos.

Neste trabalho abordam-se os conversores *buck* para controlo do circuito do sistema FV e a tipologia *Back to Back* para o sistema eólico.

No caso do conversor no sistema FV, aproveitou-se o modelo disponibilizado pelo PSIM na sua biblioteca no entanto alteraram-se todos os parâmetros do circuito enquanto que para o sistema eólico o modelo adotado neste projeto é o mesmo do PSIM.

O facto do custo dos conversores estar a diminuir gradualmete, faz com que se opte cada vez mais por máquinas de indução, pois assim é possível às máquinas de CA obter o que de melhor há

nas máquinas de CC, para além das primeiras serem mais robustas e mais fáceis de construir. Mais à frente nos capítulos 3 e 4 serão explicadas as ideias gerais associadas ao controlo dos sistema, bem como o seu modo de operação e a sua importância nos sistema.

2.7 Conclusões

Neste capítulo abordaram-se os aspetos gerais associados aos sistemas FV e eólico, nomeadamente o estado atual das tecnologias e perspectivas futuras, as estruturas dos sistemas FV e eólico e tecnologias associadas aos mesmos e também as características fundamentais dos sistemas como é o caso do comportamento do sol ou do vento. Depois dessa visão sobre esses sistemas, abordaram-se os mercados de energia, as previsões, o MPPT e os conversores, tudo isto segundo uma perspectiva geral sobre os assuntos, uma vez que serão abordados posteriormente.

Capítulo 3

Sistema Eólico

Portugal possui excelentes condições de vento em certas zonas do território nacional, sendo a produção de energia eólica um processo já bastante utilizado a grande escala (grandes parques eólicos como por exemplo no Alto da Serra do Marão). No entanto, no que diz respeito à microprodução, Portugal encontra-se ainda pouco desenvolvido, porém a tendência é para que a implementação destes sistemas aumente.

Para o dimensionamento do sistema de produção eólico deste projeto, é necessário fazer um estudo sobre as tecnologias atuais dos componentes que constituem o sistema e as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Neste capítulo será dada uma perspectiva mais aprofundada sobre os sistemas eólicos, referindo-se os sistemas eólicos de pequena dimensão, as ações aerodinâmicas associadas às turbinas em perfis estacionários e dinâmicos, o controlo de velocidade/potência, o gerador e o sistema de controlo usados, assim como os aspetos chave para o dimensionamento de um sistema do género .

3.1 Sistemas Eólicos de Pequena Dimensão

Um pouco no seguimento do que tem vindo a ser falado pelos media e por pessoas ligadas ao ramo da Energia, abordaremos nesta secção aspetos relacionados com os sistemas eólicos de pequena produção. Os sistemas eólicos sejam eles quais forem, trazem consigo vantagens no que diz respeito ao fornecimento de energia elétrica e também do ponto de vista ambiental. Estes sistemas são cada vez mais frequentes, principalmente em locais onde há bastante vento e espaço para a sua instalação. Sistemas do género sempre foram muito conhecidos, no entanto a utilização destes para abastecimento direto de energia nunca esteve em níveis semelhantes ao que se verifica atualmente [20]. Hoje em dia, esse conceito vem se afirmando e crescendo um pouco por todo o mundo.

Como já foi mencionado anteriormente, este tipo de sistema, um pouco à margem do que sucede com sistemas de grandes dimensões, necessita de condições mínimas em termos de vento

e espaço de instalação para que se justifique a implementação do mesmo, sendo por isso necessário fazer estudos sobre a localização ideal dos sistemas em causa.

Devido à concorrência entre os produtores de componentes necessários aos sistemas (turbinas e geradores), os preços destes componentes tem vindo a baixar impulsionando assim a economia energética. Quanto às características dos sistemas de pequena dimensão, e focando a atenção no tamanho das turbinas, estas apresentam entre 1 a 10 m [20]. A redução dos custos de aquisição das mesmas, mencionada anteriormente, e o facto dos conceitos aerodinâmicos estarem cada vez mais consolidados, tornou possível a fácil aquisição de sistemas do género para os mais diversos fins [20], nomeadamente o uso doméstico, estudado neste documento.

Na figura 3.1 verifica-se a relação entre o diâmetro da turbina e a área varrida.

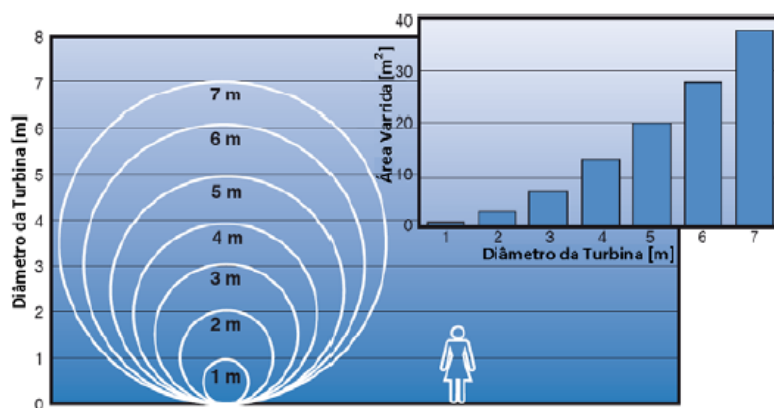


Figura 3.1: Relação entre o diâmetro da turbina e a área varrida pela mesma; Fonte: [20]

Quanto maior for a altura dos aproveitamentos eólicos, maior será o ganho em termos de potência, isto porque quanto maior é a altura da turbina maior é a velocidade do vento “captado”, tal como se pode ver na figura 3.2

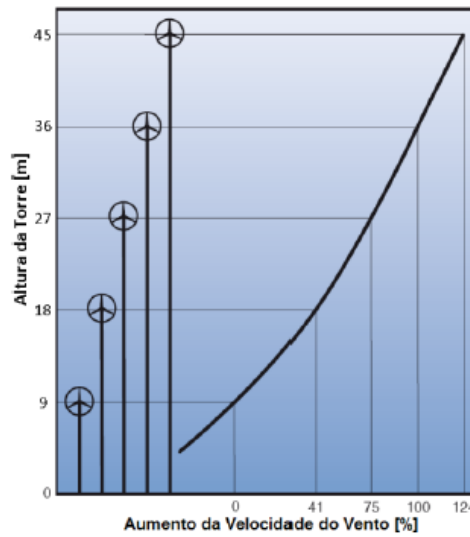


Figura 3.2: Relação entre a altura da turbina e o aumento da velocidade do vento; Fonte: [20]

$$P_{turbina} = \frac{1}{2} \times A \times \rho \times C_p \times V_{vento}^3 [42] \quad (3.1)$$

Onde:

- "A" é a área do rotor (m^2) da turbina em que $A = \pi \times R_r^2$ sendo R_r o raio da pá da turbina;
- C_p (*Power Coefficient*) representa o coeficiente de potência da turbina;
- ρ é a densidade do ar em g/m^3 ;
- V_{vento}^3 é a velocidade do vento em m/s

Uma vez que a potência de uma turbina eólica é dada pela equação 3.1, facilmente se percebe a influência da área e da velocidade do vento na potência extraída pela mesma.

Ainda no que se refere à equação 3.1, para se calcular o coeficiente de potência temos a seguinte expressão:

$$C_p(\lambda, \theta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\theta - 0.002\theta^{2.14} - 13.2 \right) \exp \frac{-18.4}{\lambda_i} [42] \quad (3.2)$$

Em que o C_p depende do valor do θ e do λ , que representam o ângulo das pás da turbina e o *tip speed ratio* respetivamente.

Normalmente considera-se um valor fixo para o θ , e por forma a obter o valor do λ_i recorre-se à seguinte expressão:

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\theta} - \frac{0.003}{\theta^3 + 1}} \quad (3.3)$$

em que:

$$\lambda = \frac{R_r \times \omega_r}{V_{vento}} \quad (3.4)$$

Onde R_r é o raio do rotor ω_r é a velocidade de rotação do eixo da turbina e V_{vento} é a velocidade do vento.

Mais à frente neste capítulo será explicada a importância do C_p nos sistemas eólicos.

3.2 Ações Aerodinâmicas

Ainda no que diz respeito aos sistemas eólicos, importa estudar as ações aerodinâmicas, isto é, os fenômenos físicos que ocorrem ao nível das turbinas e que permitem obter o melhor rendimento da força dos ventos.

3.2.1 Em perfis estacionários

Qualquer objeto posicionado em frente a um fluxo de ar apresenta uma resistência ao movimento do vento, deformando as partículas que o constituem.

Sendo assim, a resultante das forças aplicadas num corpo corresponde a um vetor aplicado no centro aerodinâmico com direção perpendicular à do corpo e no sentido do vento. Por seu lado, a intensidade da força aplicada \vec{F} é expressa pela equação 3.5 em que o parâmetro C_w depende do ângulo de ataque (α) e da turbulência do movimento. Para uma melhor percepção deste fenómeno, pode se observar a figura 3.3, que representa a ação da força para uma superfície plana.

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \rho A V_{vento}^2 C_w \quad (3.5)$$

Onde:

- ρ é a densidade do ar em g/m^3 ;
- "A" é a área de incidência da força do vento em m^2 ;
- V_{vento} é a velocidade do vento em m/s .

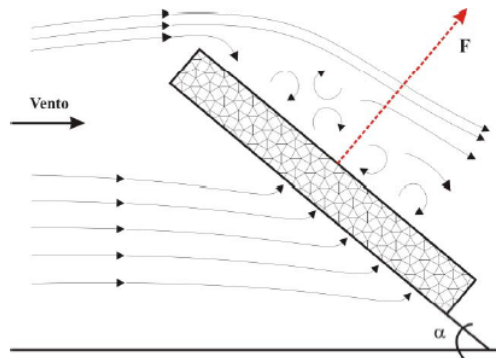


Figura 3.3: Objeto sobre ação do vento; Fonte: [20]

Analisando a figura 3.3 é possível verificar a existência de uma zona de alta pressão, no local onde incide o vento e outra de baixa pressão na zona superior do objeto, zona essa onde se verifica uma certa turbulência (partículas dispostas de forma aleatória). Se o ângulo de ataque α for grande verificar-se-á que a placa fica com tendência para se deslocar para a frente, no sentido do vento. Por outro lado, se se diminuir α , a força fará com que o objeto tenha o sentido contrário ao vento. Este fenômeno é conhecido como o “Efeito de *Bernoulli*, onde há aumento da velocidade do ar num dos lados do objeto com conseqüente queda de pressão, sendo que do outro lado verifica-se o contrário.

Se o objeto for orientado de maneira acertada, é possível diminuir a turbulência da zona com menor pressão, fazendo assim com que seja maior o aproveitamento da energia cinética do vento/massa de ar. Na figura abaixo é possível ver o efeito de *Bernoulli* num objeto orientado corretamente, neste caso uma pá de uma turbina, que hoje em dia surge com uma aerodinâmica adaptada de forma a obter o melhor rendimento energético possível, contrastando com aquilo que se verificava com as pás dos moinhos antigos. O aspeto das pás usadas hoje em dia assemelha-se às asas dos aviões e possui uma aerodinâmica semelhante às mesmas. A figura seguinte permite visualizar um objeto perfilado corretamente sob ação do vento.

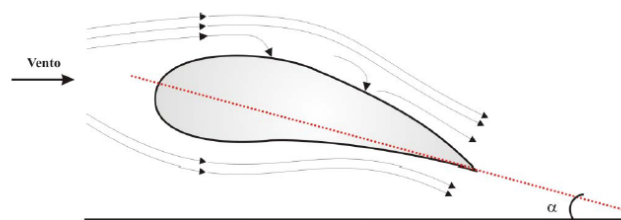


Figura 3.4: Objeto colocado corretamente sobre ação do vento; Fonte: [20]

De forma a analisar detalhadamente este fenômeno, é necessário decompor a força em duas componentes (figura 3.5). A força que está de acordo com a direção do vento, a componente “x” e a força que se encontra na perpendicular à direção do vento, a componente “y”. A componente

horizontal da força F_x e a componente vertical da força F_y são calculadas da seguinte forma:

$$F_x = F \sin \alpha = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_{\text{vento}}^2 \times C_x \quad (3.6)$$

$$F_y = F \cos \alpha = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V_{\text{vento}}^2 \times C_y \quad (3.7)$$

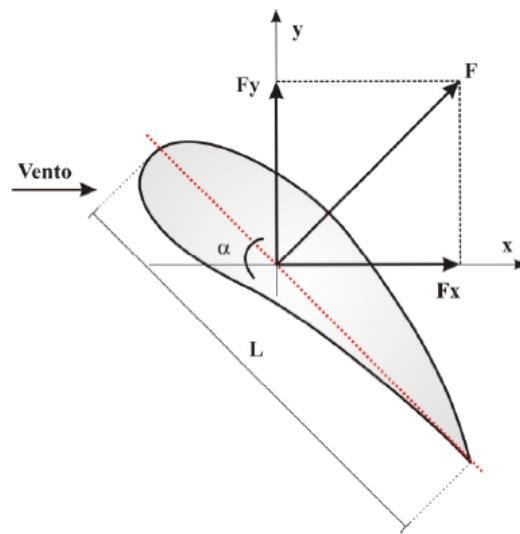


Figura 3.5: Decomposição das forças atuantes; Fonte: [20]

Os coeficientes C_x e C_y presentes nas equações acima, dizem respeito à decomposição do índice C_w , que se encontrava na equação 3.5. Esta decomposição acontece porque C_w corresponde apenas a perfis planos, tal como sucede na figura 3.3. Para um α fixo, a relação dos coeficientes é dada pela seguinte expressão:

$$f = \frac{C_y}{C_x} = \frac{1}{\tan(\alpha)} \quad (3.8)$$

$$C_y = f(C_x) \quad (3.9)$$

Através da equação anterior é possível traçar uma curva, a curva de perfil, que é obtida através das medições das componentes horizontal e vertical da força \vec{F} utilizando-se uma balança de torção num túnel de vento de forma a projetar o melhor perfil para o aproveitamento da força na direção desejada [20].

3.2.2 Em perfis de rotação

Depois de assimilados os conceitos relacionados com os perfis estacionários, resta agora olhar para os perfis rotacionais. No entanto, antes de tentar perceber as forças que atuam sobre as pás em movimento, é necessário perceber o conceito de velocidade relativa do vento. Ora, a velocidade relativa do vento \vec{c} é nada mais que a soma de dois vetores, sendo eles a velocidade estacionária do vento \vec{v} e também a velocidade tangencial da hélice \vec{u} , criada pelo movimento de rotação da mesma [43]. Na figura seguinte é possível visualizar o vetor que representa a velocidade relativa do vento, já mencionada, bem como as suas duas componentes (estacionária e de rotação). Quanto aos ângulos formados por essas velocidades, podem ser visualizados na figura 3.6, onde o ângulo de ataque alfa corresponde ao ângulo formado entre a direção relativa do vento e a “linha de corda”, que representa uma linha reta que atravessa a hélice em todo o seu comprimento (raio) [20]. Ao ângulo formado pela direção relativa do vento com o plano de rotação dá-se o nome de ângulo relativo φ [20]. Na figura abaixo é possível observar as forças que atuam numa pá de uma turbina em movimento.

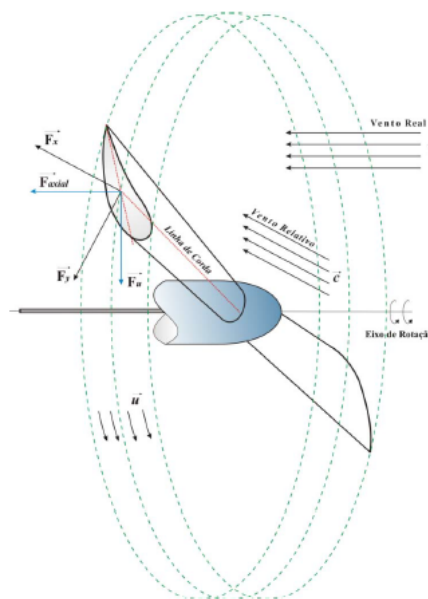


Figura 3.6: Forças que atuam na hélice em movimento; Fonte: [20]

Onde:

$$\beta = \varphi - \alpha \quad (3.10)$$

- β representa o ângulo de passo.

Assim como já foi mencionado na secção dos perfis estacionários, a força (3.5) decompõe-se em duas vertentes, a componente horizontal F_x e a vertical F_y . Neste caso, e com a turbina em movimento, a composição das forças é a mesma, no entanto diz respeito a cada momento da rotação da hélice. A grande diferença para os perfis estacionários é que neste caso a direção do

vento às quais são referenciadas as forças é a direção relativa do vento, tal como se pode ver na figura 3.6.

Desta forma, ao se projetar as componentes horizontal e vertical da força ao longo do plano de rotação, obtêm-se outras duas forças: a força útil F_u e força axial F_a . A primeira é paralela a \vec{u} , responsável pelo rotação da hélice e a segunda, perpendicular \vec{u} e exerce força sobre o eixo do rotor.

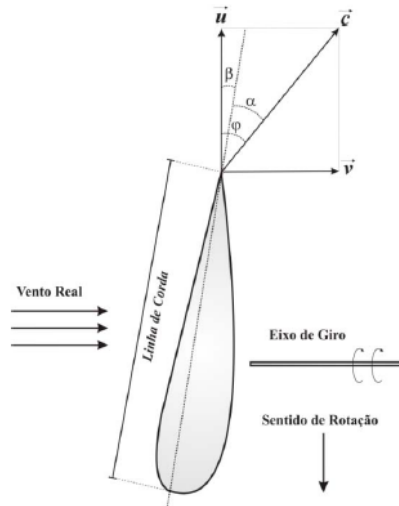


Figura 3.7: Velocidades e ângulos da hélice da turbina em movimento.; Fonte: [20]

Tendo em conta os perfis rotacionais, as equações 3.6 e 3.7 estudadas nos perfis estacionários têm que ser reestruturadas. Surgem assim as novas expressões para F_x e para F_y :

$$F_x = F \sin \alpha = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times c^2 \times C_x \quad (3.11)$$

$$F_y = F \cos \alpha = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times c^2 \times C_y \quad (3.12)$$

Por seu lado, F_u e F_a são dadas por:

$$F_u = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^2 \times C_y \times \frac{\sin(\varphi - \alpha)}{\sin^2(\varphi) \cos(\alpha)} \quad (3.13)$$

$$F_a = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^2 \times C_y \times \frac{\cos(\varphi - \alpha)}{\sin^2(\varphi) \cos(\alpha)} \quad (3.14)$$

Analisando as equações anteriores verifica-se que à medida que α aumenta a componente "y" da força também aumenta, isto até α ter um valor de mais ou menos 15 graus. Uma vez que o valor de \vec{u} varia ao longo do comprimento da pá então \vec{c} também varia, logo β também varia à medida que o comprimento da pá aumenta.

3.3 Controlo de Velocidade e Potência

O controlo de velocidade do sistema eólico é extremamente importante no dimensionamento de um sistema do género, pois é através deste que se consegue garantir que a estrutura do sistema permanece intacta e em perfeitas condições. É também com o auxílio ao controlo de velocidade que se consegue controlar a potência do sistema. Existem dois tipos de controlo de velocidade bastante utilizados, sendo eles o controlo por *stall* e o controlo *pitch*.

O controlo por *stall* possui ângulo de passo fixo, é robusto e económico isto porque só depende das características construtivas do sistema. Este tipo de controlo é bastante utilizado nos sistemas de pequeno porte e com velocidade variável, como é caso deste projeto. Quanto ao controlo por *pitch*, que se faz quando há variação do ângulo de passo, não é um método recorrente para sistemas de pequena dimensão.

3.3.1 Controlo por *stall*

O efeito *stall* ocorre quando o fluxo de ar em torno de um objeto deixa de se fixar à superfície do mesmo e passa a girar de forma turbulenta, diminuindo assim a força de sustentação (F_y), como se pode ver na figura 3.3.

O controlo por *stall* limita a velocidade para um valor máximo, ou seja, o controlo apenas atua a partir de uma determinada velocidade de referência e acima desta. Sendo assim, a energia captada através do vento pode ser aproveitada da melhor maneira, garantindo-se assim a velocidade tangencial máxima projetada para a turbina e impedindo também a ocorrência de danos estruturas no sistema [43][44].

Tendo em conta as equações presentes na secção anterior, verifica-se que se se manter o valor de β e da velocidade angular, à medida que a velocidade do vento aumenta, o ângulo relativo φ também aumenta e consequentemente o ângulo de ataque α também aumenta.

No *stall* passivo projeta-se a geometria com recurso a ângulos fixos para assegurar que assim que a velocidade do vento se torne alta, seja criada uma zona de turbulência [20]. Este tipo de controlo apresenta vantagem de não se usarem partes móveis, no entanto o controlo por *stall* passivo é um processo complicado, uma vez que requer cálculos aerodinâmicos difíceis de realizar e também apresenta o inconveniente das hélices serem submetidas a uma grande sobrecarga mecânica no momento do *stall*. Isto sucede quando α atingir os 15 graus, isto porque depois do ângulo atingir esse valor, a força de sustentação começa a diminuir drasticamente sendo que por outro lado a força de arrasto (F_x) aumenta.

Já no *stall* ativo, recorre-se a um elemento mecânico, que faz com que o movimento rotacional seja sincronizado de forma a limitar a velocidade rotacional das pás da turbina, isto é, quando a turbina ultrapassa o valor da sua potência nominal, com uma determinada velocidade de rotação da turbina, e tendo em conta uma velocidade nominal do vento definida na fase do projeto, as pás movimentam-se de forma a aumentar o valor de α , fazendo com que seja atenuado o excesso de energia mecânica. As vantagens associadas a este método residem no facto de ser possível obter um controlo de potência mais eficiente, na redução da carga mecânica imposta ao sistema por

parte do vento e garantia de segurança perante condições atmosféricas mais exigentes, como por exemplo as rajadas de vento.

Resumindo, no controlo por *stall* a geometria do perfil das pás do rotor é tal que assim que o sistema sente a presença de uma velocidade do vento muito elevada, é criada uma turbulência e as pás entram em perda, baixando o valor da sustentação. Assim que a sustentação baixa as pás deixam de acelerar.

3.3.2 Controlo por *pitch*

No controlo por *pitch* mantem-se o ângulo de ataque α dentro dos valores pretendidos quando a velocidade angular e a velocidade do vento se alteram. Este tipo de método aplica-se a sistemas de alta dimensão e o seu objetivo passa por eliminar o excesso de energia e fazer parte do próprio sistema de controlo de potência [44]. No entanto, apesar de ser um método bastante usado, trata-se também de um processo complexo.

Chama-se controlo por passo (*pitch*) porque se atua exatamente no ângulo de passo β , descrito na equação 3.10.

Até ao instante em que se atinge o valor nominal da velocidade de projeto, para a qual está definido produzir a potência nominal, o sistema de controlo vai variando o valor de β da pá, de forma a maximizar a componente da força que contribui para o binário.

Quando a velocidade do vento é superior à nominal, o controlo por *pitch* atua de forma a que o binário motor produzido seja proporcional à potência nominal, ou seja, faz com que através de uma inclinação das pás, se diminua o binário.

3.3.3 Vantagens e desvantagens dos métodos de controlo estudados

O controlo por *stall* tem como grande vantagem o facto de ser um processo simples, uma vez que há ausência de mais partes em movimento, sendo por isso mais barata [11].

Apesar disso, o controlo por *stall* pressupõe cálculos um pouco complexos no que toca a determinar o ângulo de ataque α para o qual a pá deverá entrar em perda.

Outras desvantagens associada ao controlo por *stall* reside no facto das turbinas serem incapazes de auxiliarem os processos de arranque e paragem, isto é, no arranque, quando a velocidade do vento é reduzida, a turbina não possui binário motor suficiente para garantir o arranque, sendo por isso necessário um motor auxiliar para realizar essa tarefa, ou por outro lado pôr o gerador a funcionar como motor até o rotor estar à velocidade necessária para não aninhar. No processo de paragem, não é possível colocar as pás na posição ideal para esse efeito, pelo que é necessário um sistema auxiliar para esse efeito, através de meios aerodinâmicos.

No que se refere ao controlo por *pitch*, este tem a vantagem de se conseguir um bom controlo de potência para qualquer gama de velocidade do vento. Para além disso, variando o ângulo de passo consegue-se fazer com que os esforços mecânicos sobre as pás sejam reduzidos comparativamente ao que sucede com o controlo por *stall*. Por outro lado, apesar de garantir uma melhor

resposta às variações atmosféricas, o controlo por *pitch* requer uma tecnologia mais avançada em termos mecânicos.

Na figura 3.8 é possível observar o comportamento dos sistemas eólicos quando sujeitos ao controlo *pitch* ou *stall*.

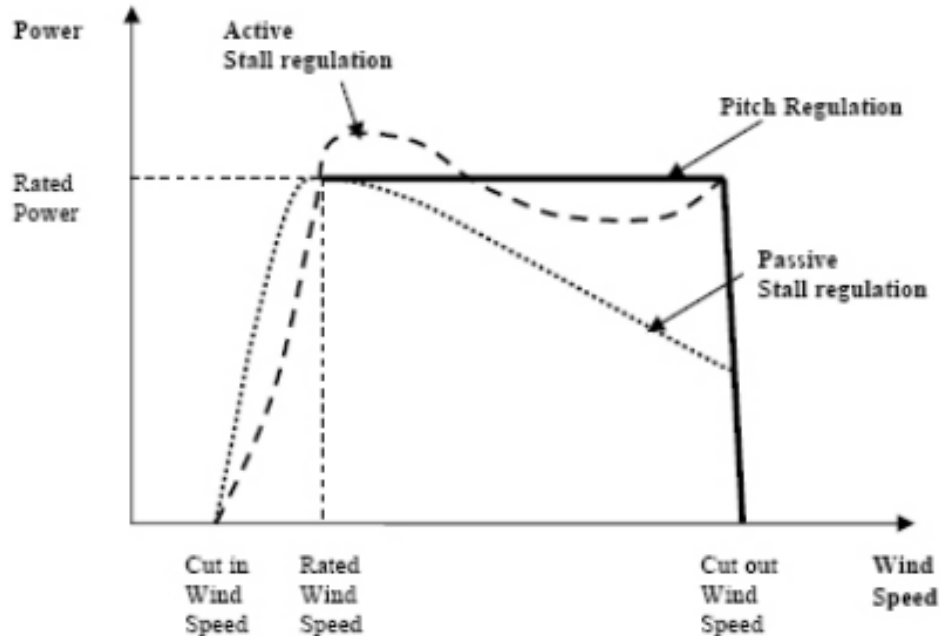


Figura 3.8: Controlos de potência e velocidade (*pitch* e *stall*); Fonte: [21]

3.4 Modelo matemático do SQIG

Nesta secção será explicado o modelo elétrico do gerador usado para o sistema eólico em causa

O gerador presente neste sistema é o *Squirrel Cage Induction Generator* (Gerador de indução em Gaiola de Esquilo), cujo modelo matemático está apresentado abaixo. Após isso, será demonstrada a parte do controlo associada à ligação desse mesmo gerador à rede elétrica, tal como se pretende neste trabalho.

Uma máquina elétrica pode ser descrita como motor ou gerador, porém podem ser descritas com o mesmo conjunto de equações e são essas mesmas equações que regem a operação das máquinas elétricas. O sistema de equações pode ser dividido em 2 grupos distintos, as de tensão e as de binário. Por forma a simplificar essas mesmas equações, é comum considerar o seguinte:

- Uma máquina de indução com as três fases simétricas e equilibradas, com um único enrolamento rotórico e intervalo constante;

- O material é linear, ou seja, a saturação do ferro é desprezada;
- As perdas no ferro também são negligenciadas;
- A permeabilidade magnética do ferro é infinita comparativamente à permeabilidade do ar, o que significa que a densidade do fluxo magnético é radial para o intervalo;
- Quer os enrolamentos rotóricos como os estáticos representam enrolamentos distribuídos, que geram sempre uma distribuição campos magnéticos sinusoidais no intervalo.

Todas as hipóteses mencionadas acima guiam-nos para um conjunto de equações que descrevem o comportamento dinâmico da máquina de indução.

$$\begin{Bmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s^{abc} & 0 \\ 0 & r_r^{abc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

- v_s^{abc} é vetor das tensões do enrolamento estático;
- v_r^{abc} é vetor das tensões do enrolamento rotórico;
- r_s^{abc} é vetor das resistências no enrolamento estático;
- r_r^{abc} é vetor das resistências no enrolamento rotórico;
- i_s^{abc} é vetor das correntes no enrolamento estático;
- i_r^{abc} é vetor das correntes no enrolamento rotórico;
- λ_s^{abc} é vetor dos fluxos no enrolamento estático;
- λ_r^{abc} é vetor dos fluxos no enrolamento rotórico;

A relação entre os fluxos e a corrente nos enrolamentos do rotor e do estator é dado pela seguinte expressão:

$$\begin{Bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

Onde cada um dos termos representa uma matriz ou vetor tridimensional.

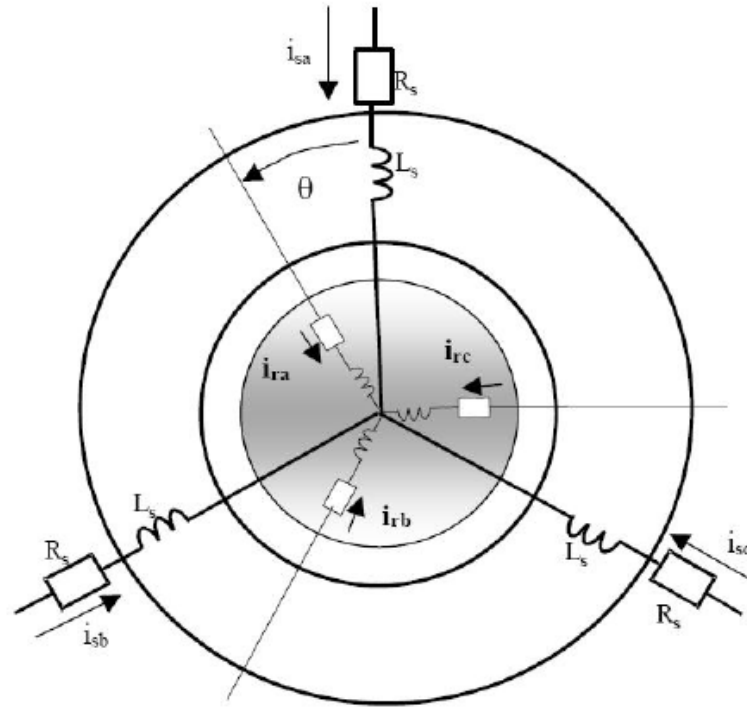


Figura 3.9: Esquema elétrico da máquina de indução; Fonte: [22]

Assim, e de acordo com a figura 3.9, os vetores podem ser descritos da seguinte forma:

$$v_s = \begin{pmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{pmatrix}, v_r = \begin{pmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{pmatrix}, i_s = \begin{pmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{pmatrix}, i_r = \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

As matrizes das impedâncias são as seguintes:

$$r_s^{abc} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$r_r^{abc} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$L_{sr}^{abc} = \left\{ L_{rs}^{abc} \right\}^t = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta_r - 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 2\frac{\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta_r - 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} L_{sr} \quad (3.21)$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rs} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{rr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Em que:

- w_r é o ângulo de orientação do eixo do gerador;
- r_s é a resistência dos enrolamentos estatóricos;
- r_r é a resistência dos enrolamentos rotóricos;
- L_{ss} é a auto-indutância dos enrolamentos estatóricos sem o enrolamento responsável pelo fluxo de perdas;
- L_{rr} é a auto-indutância dos enrolamentos rotóricos sem o enrolamento responsável pelo fluxo de perdas;
- L_{sm} é a indutância de ligação dos enrolamentos do estator;
- L_{rm} é a indutância de ligação dos enrolamentos do rotor;
- L_{sr} é o valor máximo para as indutâncias de ligação entre os enrolamentos do estatóricos e rotóricos;
- L_{ls} representa uma indutância dissipativa dos enrolamentos do estator;
- L_{rs} representa uma indutância dissipativa dos enrolamentos do rotor;

Segundo a teoria da conversão eletromecânica vem que:

$$T_r = \frac{1}{2} [i]^t \times \frac{\delta [L(\Theta_r)]}{\delta (\Theta_r)} \times [i] \quad (3.23)$$

Onde:

- T_r é o binário do eixo do rotor;
- L_{θ_r} é a matriz das indutâncias de ligação. $L(\theta_r) = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix}$

Normalmente as máquinas de indução têm um número de par de polos superior a 1. Teoricamente, isto pode ser entendido como um multiplicador ideal, com uma relação de transmissão (P)

entre o ângulo mecânico da máquina θ_r e o ângulo elétrico do sistema. Na equação abaixo surge a equação anterior com o P incluído:

$$T_r = \frac{P}{2} [i]^t \times \frac{\delta [L(\Theta_r)]}{\delta (\Theta_r)} \times [i] \quad (3.24)$$

- P é o número de pares de polos da máquina.

Sem deixar de ter em conta os aspetos gerais, pode-se considerar o número de pares de polos igual a 1. No entanto, pretende-se usar os resultados obtidos em casos de estudo diferentes, ou seja, onde as máquinas consideradas possuem um número superior de pares de polos.

A equação 3.24 demonstra a evolução do binário ao longo do tempo, dependendo do valor das correntes que circulam nos enrolamentos do rotor e do estator e também do afastamento (ângulo) entre o enrolamento 1 do estator e o enrolamento 1 do rotor.

Desenvolvendo a equação 3.23 é possível chegar à seguinte expressão:

$$T_r = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix}^t \times \begin{bmatrix} 0 & N_{sr} \\ N_{rs} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (3.25)$$

Onde:

$$N_{sr}^{abc} = \{N_{rs}^{abc}\}^t = \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + 2\frac{\pi}{3}) & \sin(\theta_r - 2\frac{\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r - 2\frac{\pi}{3}) & \sin(\theta_r) & \sin(\theta_r + 2\frac{\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r + 2\frac{\pi}{3}) & \sin(\theta_r - 2\frac{\pi}{3}) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Da mesma forma, é possível chegar ao valor do binário mecânico produzido pela máquina. É necessário apenas multiplicar a equação 3.25 por P. Logo, vem que:

$$T_m = \frac{P}{2} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix}^t \times \begin{bmatrix} 0 & N_{sr} \\ N_{rs} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

Este tipo de máquina é conhecido também como gerador de indução em curto-circuito devido ao facto dos enrolamentos rotóricos estarem ligados em CC.

$$\begin{Bmatrix} v_s^{abc} \\ 0^{abc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s^{abc} & 0 \\ 0 & r_r^{abc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{Bmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} \begin{Bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

3.5 Cadeia de Conversão *Back to Back*

Depois de demonstrado o modelo matemático do SQIG, através do qual podemos descrever o modo de funcionamento do gerador, resta agora demonstrar como é que se executa a parte do controlo associada ao sistema eólico, bem como a ligação deste à rede.

Na figura seguinte (3.10) é possível visualizar a constituição de um sistema tipo no seu todo, isto é, a turbina, o gerador eólico (SQIG), o sistema *Back to Back* e a rede elétrica.

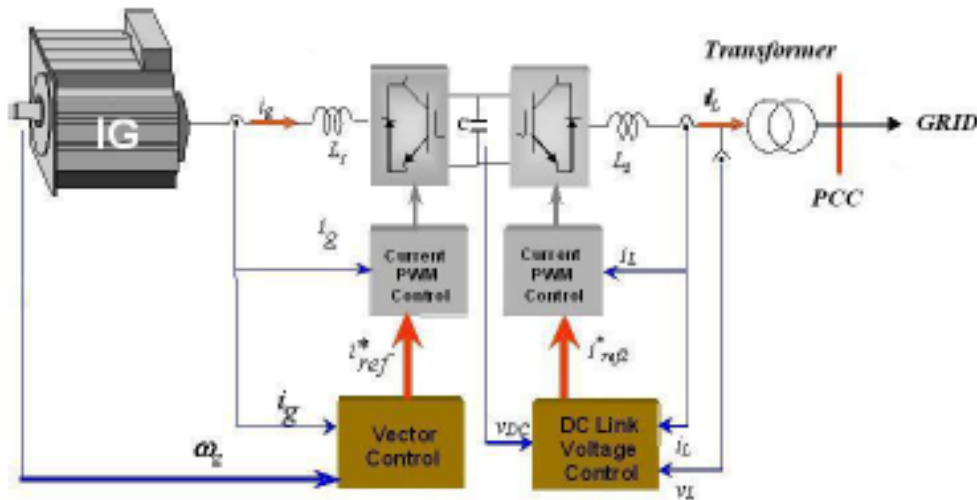


Figura 3.10: Esquema elétrico do sistema eólico; Fonte: [23]

O sistema pode ser dividido em duas partes, sendo a primeira a parte de controlo da geração e a segunda o controlo da ligação à rede. Quer uma parte quer outra são constituída por pontes retificadoras formadas por IGBT, que são dispositivos altamente eficiente e que atuam rapidamente. Apesar de serem uma tecnologia relativamente recente, estes dispositivos surgem cada vez mais nas aplicações eletrónicas. Na primeira fase de controlo, a do gerador, atua-se sobre a corrente da fases à saída do gerador e na velocidade de rotação do gerador e na segunda, da rede, atua-se sobre a tensão e a corrente.

A tensão aos terminais do condensador, é medida e comparada com a tensão de referência V_{ref} . A diferença é medida e transmitida a um controlador que produz uma referência de potência ativa (p^*). Normalmente considera-se que a tensão de referência tem um valor 35% superior ao valor máximo da tensão na rede. Quando V_{dc} é superior ao valor de referência, é gerado um sinal positivo de potência (p^*) e a energia acumulada no condensador é transmitida para a rede.

Sendo assim, para se calcular o valor das correntes de referências nos conversores (I_{α} e I_{beta}) recorre-se à seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha ref} \\ I_{\beta ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2)} \times \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -p^* \\ -q^* \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Onde p^* e q^* são as referências de potência (real e imaginária) e V_{α} e V_{β} são as tensões no PCC (figura).

As correntes de referência são aplicadas no vetor de controlo da corrente. Quer as correntes de referência quer as correntes medidas são transformadas para os eixos dq.

Para uma melhor perceção do que foi mencionado, encontra-se abaixo a figura 3.11.

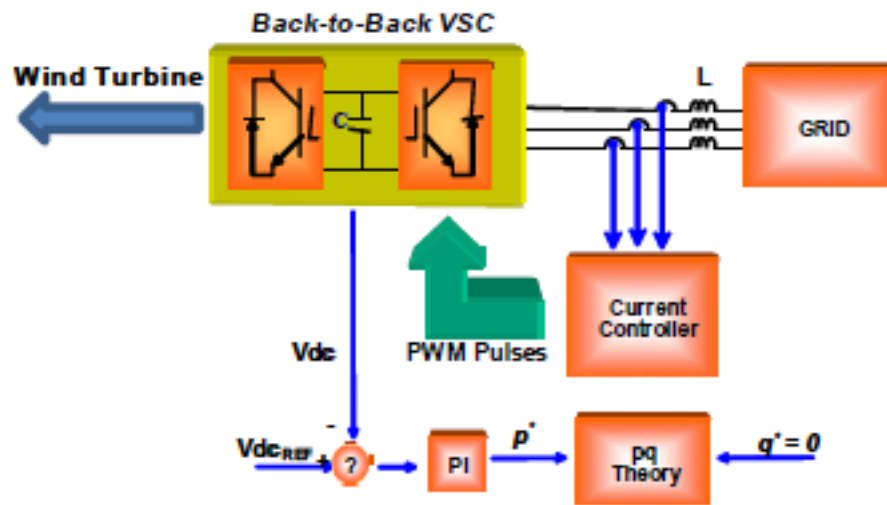


Figura 3.11: Diagrama de blocos representativo do controlo de tensão/potência; Fonte: [23]

A parte de controlo do lado do gerador é baseada no controlo orientado do campo. Neste caso, o campo de referência é campo magnético estatórico cujo seu ângulo é obtido de acordo com métodos indiretos.

O objetivo deste processo é ter a turbina eólica a funcionar perto do seu MPP. Para isso é necessário ter conhecimento sobre o modo de funcionamento da turbina, isto é, os pressupostos matemáticos associados à mesma.

A potência eléctrica produzida por uma turbina é dada pela equação 3.1, já descrita numa secção anterior a esta.

Basicamente, a potência mecânica produzida por uma turbina é dada pelo produto da potência eléctrica pelo coeficiente de potência (C_p).

$$P_{mec} = P_{elet} \times C_p \quad (3.30)$$

Onde:

- P_{mec} é a potência mecânica;
- P_{elet} é a potência eléctrica produzida;
- C_p é o coeficiente de potência

A figura 3.12 mostra a relação entre o C_p e o λ (*tip ratio*). O ponto máximo dessa curva representa o MPP. O λ representa a relação entre da velocidade da pá e a velocidade do vento.

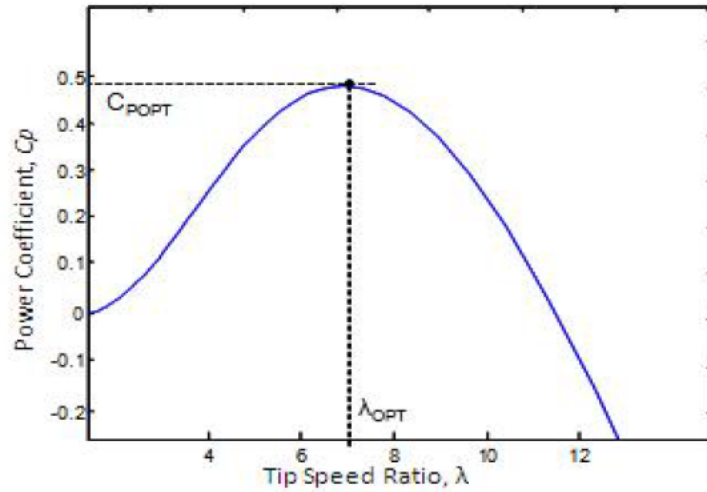


Figura 3.12: Relação entre C_p e λ ; Fonte: [23]

A equação seguinte diz respeito ao cálculo da velocidade angular de referência do sistema:

$$W_{ref} = \frac{\lambda \cdot V_{vento}}{R} \quad (3.31)$$

Onde "R" é o raio do rotor da turbina e V_{vento} é a velocidade do vento.

O binário motor aplicado ao gerador é expresso pelo seguinte fórmula:

$$T_m = \frac{T_{turbina}}{G_r} \quad (3.32)$$

Em que G_r é a relação de transmissão.

O controlo terá que garantir que a velocidade angular vista aos terminais do gerador é igual à velocidade referência, isto para uns determinados valores de λ e de C_p , tendo sempre como objetivo obter o MPPT.

O binário motor da turbina é dado pela seguinte equação:

$$T_{turbina} = \frac{1/2 \times A \cdot \rho \cdot V_{vento}^3 \cdot C_p}{W_t} \quad (3.33)$$

Onde A é a área da pá e W_t é a velocidade angular do eixo da turbina.

Na parte do controlo referente à rede, é tido em conta a forma de ligação do sistema produtor à própria rede, por forma a que esta seja feita corretamente e de forma sincronizada.

No projeto realizado usou-se um modelo PSIM fornecido no próprio **software** e que serviu de base a toda a simulação do sistema eólico pretendido.

3.6 Dimensionamento de Sistemas Eólicos

Para além dos tópicos abordados mais atrás neste documento no que diz respeito às características dos sistemas eólicos (rugosidade, características do vento e etc), é importante ter em atenção os aspetos mais técnicos associados ao dimensionamento de um sistema eólico.

Um sistema eólico ligado à rede é formado normalmente pelos componentes representados na figura 3.13.

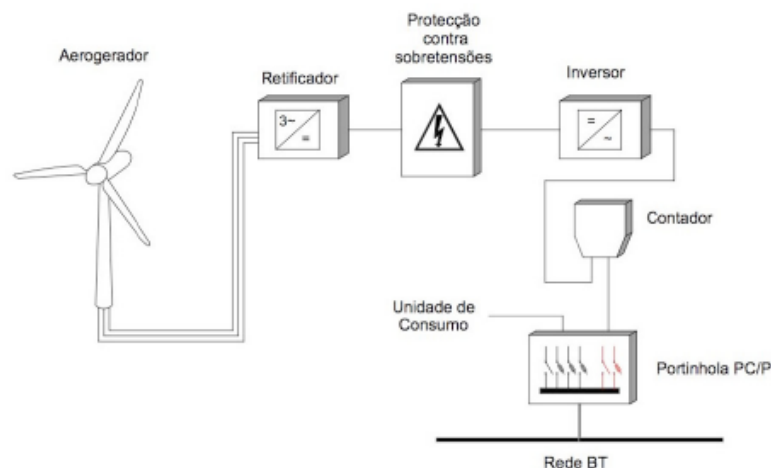


Figura 3.13: Constituição de um sistema eólico ligado à rede; Fonte: [24]

O aspeto essencial no dimensionamento de um sistema eólico é garantir que todos os componentes trabalham de forma correta, procurando garantir-se a sintonia entre os componentes. Um sistema bem dimensionado é meio caminho andado para uma utilização eficiente de todo o sistema, evitando assim problemas com avarias ou manutenções aos componentes. Todos os dispositivos devem ser dimensionados tendo em conta as condições de funcionamento esperadas bem como as características do local onde se situará a instalação.

O retificador tem como função retificar a corrente proveniente do gerador, que é trifásica e alternada. Normalmente exige-se que a tensão de *ripple* associada ao retificador não exceda os 10%. Alguns fornecedores incluem os retificadores em conjunto com as turbinas, sendo que quando assim não suceder terá que ser adquirido à parte.

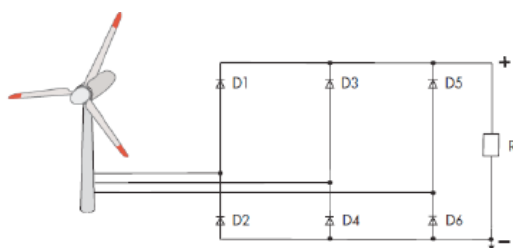


Figura 3.14: Retificador ligado ao gerador; Fonte: [24]

É necessário também que o sistema possua controladores de tensão por forma a proteger os inversores contra sobretensões.

As sobretensões podem ocorrer devido a:

- grandes velocidades de rotação das turbinas devido aos ventos fortes;
- um aumento de velocidade da turbina causado por desligar o inversor da rede.

O inversor dá a possibilidade de estabelecer a ligação entre o gerador e a rede. A corrente CC que chega do retificador é transformada em corrente AC e adaptada para as condições de exploração necessárias (por exemplo 230V e 50Hz), isto tudo com a ajuda dos inversores. O lado DC do circuito deverá possuir um disjuntor capaz de desligar o gerador do inversor.

O contador permite visualizar a energia produzida pelo sistema eólico e deverá estar num local de fácil acesso. O contador que mede a energia que entregue à rede é diferente do contador que mede a energia comprada à rede.

3.7 Conclusões

Neste capítulo abordou-se aspetos mais técnicos sobre os sistemas eólicos, como a fundamentação matemática do gerador utilizado e a cadeia de conversão, para além de outros aspetos como o controlo de potência e velocidade e as acções aerodinâmicas nas pás do rotor da turbina. Estes aspetos são importantes pois permitem perceber o comportamento dos sistemas eólicos, conforme se terá possibilidade de ver mais à frente no documento.

Capítulo 4

Sistema Fotovoltaico

Neste capítulo pretende-se abordar um leque de assuntos relacionados com o sistema fotovoltaico. Ao contrário do que se fez no capítulo 2, neste pretende-se mostrar uma perspetiva mais técnica sobre o assunto, procurando-se apontar mais na direção do projeto propriamente dito, falando-se sobre as aplicações práticas dos sistemas, os tipos de sistemas FV, o MPPT em sistemas do género, conversores e aspetos a ter em conta no dimensionamento dos sistemas. Tudo isto é essencial para se perceber mais sobre os sistemas FV.

4.1 Aplicações práticas de Sistemas FV

Na secção 2.2 foi abordado o tema dos sistemas fotovoltaicos, bem como os pressupostos teóricos em que assenta esse tipo de tecnologia, como por exemplo a sua história, atualidade, analisando-se também os componentes que constituem um sistema do género, as características dos sistemas e o panorama atual deste ramo de energia a nível nacional. No entanto, o que se pretende com este trabalho é projetar um sistema híbrido, que comporta energia proveniente do sol e energia proveniente do vento. Focando as atenções na primeira, o sol, procura-se explicar neste subcapítulo as aplicações práticas que os sistemas FV podem ter, tentando-se sempre projetar o assunto para o contexto que interesse neste trabalho, ou seja, a microprodução com vista a satisfazer os consumos e permitindo também o fornecimento de energia para a rede.

Neste caso concreto e perante um diagrama de cargas de uma moradia (a apresentar nas previsões dos consumos), pretende-se projetar um sistema produtor que consiga suportar parcialmente a carga, isto porque parte da mesma terá que ser suportada pelo sistema eólico.

O sistema produtor FV em causa é um sistema de pequena potência, na ordem dos 2 kW fruto da série de 10 painéis FV, isto porque a carga a alimentar é uma moradia unifamiliar, onde os consumos médios diários andam à volta dos 8 a 10 kWh. Como é óbvio, esse valor poderá ser diferente consoante o caso de estudo, mas foi a pensar nesta gama de valores de que se formulou o pensamento por forma a projetar um sistema produtor capaz de alimentar as cargas, sendo também capaz de produzir em excesso por forma a fornecer energia à rede. Como já foi referido

anteriormente, aquando da projeção do sistema FV, ter-se-á que ter sempre presente que o sistema na sua totalidade engloba mais um subsistema, o eólico.

4.2 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Dentro dos sistemas fotovoltaicos, é possível fazer-se uma diferenciação entre dois tipos distintos de sistemas do género, sendo eles:

- Isolados;
- Ligados à rede.

Sendo que dentro dos sistemas isolados também surgem dois subgrupos:

- Sistemas autónomos;
- Sistemas híbridos.

Os sistemas autónomos dizem respeito a sistemas que dependem apenas da energia solar para satisfazer as necessidades de consumo, podendo estes sistemas estar dotados de acumuladores com vista a armazenar energia para autoconsumo produzida durante o dia e restituí-la à noite ou durante os períodos em que a incidência solar seja reduzida. Este tipo de sistemas é recomendado para instalações que não possuem interligação com a rede de energia, permitindo assim que os consumos dos aparelhos elétricos ou das instalações de consumo sejam sempre satisfeitos [35]. Nos países em desenvolvimento, esta tipo de sistema tem uma enorme tendência para crescer, isto porque estes sistemas garantem o acesso a energia elétrica mesmo em meios remotos e com pouco acesso. O facto do custo de implementação destes sistemas estarem a baixar aliado ao facto das tecnologias associadas a estes sistemas estarem em evolução contribuem também para o crescimento destes sistemas [36]. Os sistemas autónomos são constituídos essencialmente por:

- Gerador fotovoltaico (constituído por um ou vários módulos, normalmente em paralelo);
- Reguladores de carga;
- Baterias/Acumuladores;
- Cliente/Consumo.

Na figura (4.1) é possível visualizar uma imagem ilustrativa de um sistema isolado autónomo.

Quanto aos sistemas híbridos, estes são independentes da rede de distribuição, no entanto combinam a energia proveniente do sol com outras formas de energia, sendo elas renováveis ou não. Normalmente é composto por um gerador fotovoltaico e um aerogerador ou um grupo gerador a combustível. Recorre-se a este tipo de mecanismos quando os sistemas a alimentar necessitam de alimentação permanente e elevada potência, assim como quando não se pretende fazer um grande

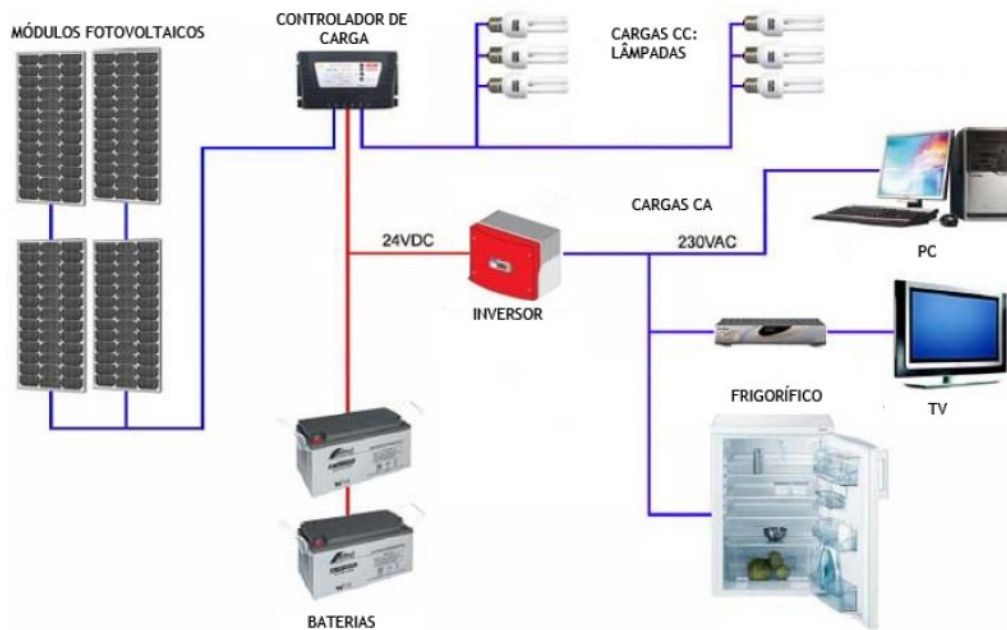


Figura 4.1: Sistema FV autónomo isolado da rede; Fonte: [25]

investimento em painéis fotovoltaicos e baterias. A este tipo de sistemas tem que estar associados sistemas de controlo mais eficientes que os sistemas isolados autónomos. No caso do sistema híbrido ser composto por FV/Diesel, o gerador Diesel funcionará quando as baterias atingirem o limite mínimo de carga e deixará de funcionar quando se atingir um nível aceitável de carga nas mesmas baterias [35]. A figura 4.2 ilustra um sistema fotovoltaico híbrido.

No que diz respeito a sistemas ligados à rede elétrica, estes podem-se dividir em dois grupos:

- Microgeração (produção é feita para autoconsumo e com capacidade de autonomia);
- Centrais solares (a produção é feita para vender à rede posteriormente).

Este tipo de sistemas são um forte exemplo do facto de cada vez mais se procurar descentralizar a produção de energia elétrica. Com este tipo de sistemas consegue-se ter os locais da produção muito mais próximos dos locais de consumo o que se traduz em menos perdas para o sistema. Para além das perdas, a implementação de sistemas FV ligados à rede faz com que a necessidade de reforço das linhas de transmissão e distribuição seja cada vez mais reduzida, o que traz grandes vantagens a nível financeiro para as entidades responsáveis pelo sistema elétrico. Um sistema com estas características permite que se produza energia para autoconsumo e ao mesmo tempo dá a possibilidade de vender a energia excedente para a rede elétrica. Por outro lado, em caso de necessidade, este tipo de sistema pode se abastecer da rede, sendo que a possibilidade de realizar estas trocas faz com que não seja necessário investir em baterias de acumuladores. Este tipo de sistemas é constituído por módulos fotovoltaicos, inversores, estruturas de suporte e pode

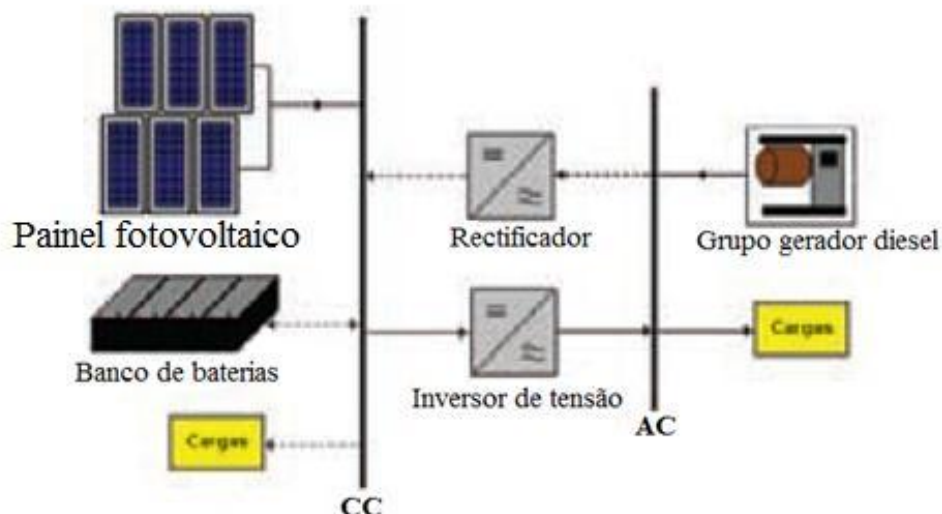


Figura 4.2: Sistema FV híbrido isolado da rede; Fonte: [26]

ter também dispositivos para seguir o sol. A rede acaba por assumir o papel de bateria de acumuladores infinita, sendo que a ligação da rede elétrica ao sistema FV pode ser feita através de um conversor DC/AC que garante o sincronismo entre a corrente de saída do ondulador (alternada) com a da rede. O facto de se recorrer a sistemas FV com a possibilidade de vender à rede prende-se também com a necessidade de se querer tornar o sistema mais viável, funcionando a venda de energia à rede como fonte de rendimento. A título de exemplo, um produtor particular de energia pode vender energia à EDP por 0.65 €/kWh e ao mesmo tempo pode comprar energia à rede por 0.1218 €/kWh. Através destes valores é possível verificar a diferença entre o preço da energia que se vende e aquela que se compra, com clara vantagem para o microprodutor. No entanto, para o acesso a regime bonificado, só se pode instalar até 3.68 kW em módulos fotovoltaicos.

No que diz respeito a custos, estes estão principalmente ligados à compra dos módulos fotovoltaicos que constituem o sistema. Quanto aos custos de produção, estes são cada vez mais baixos e a tendência é que continue a baixar. Sendo assim, estes sistemas (ligados à rede) são os mais indicados para locais urbanos de clima quente, onde o custo de produção de 1 kWh num sistema FV é equivalente ao custo de outras formas de produção de eletricidade. Em locais onde a incidência solar não é tão elevada, um sistema deste género não se apresenta como uma solução rentável. Quanto aos sistemas fotovoltaicos residenciais ligados à rede, estes surgem como uma solução com potencial de mercado, isto porque a tendência é para que os custos associados a estes sistemas baixem, tornando esta tecnologia uma forte concorrente no mercado de energia. Na figura 4.3 está representado um sistema FV ligado à rede elétrica.

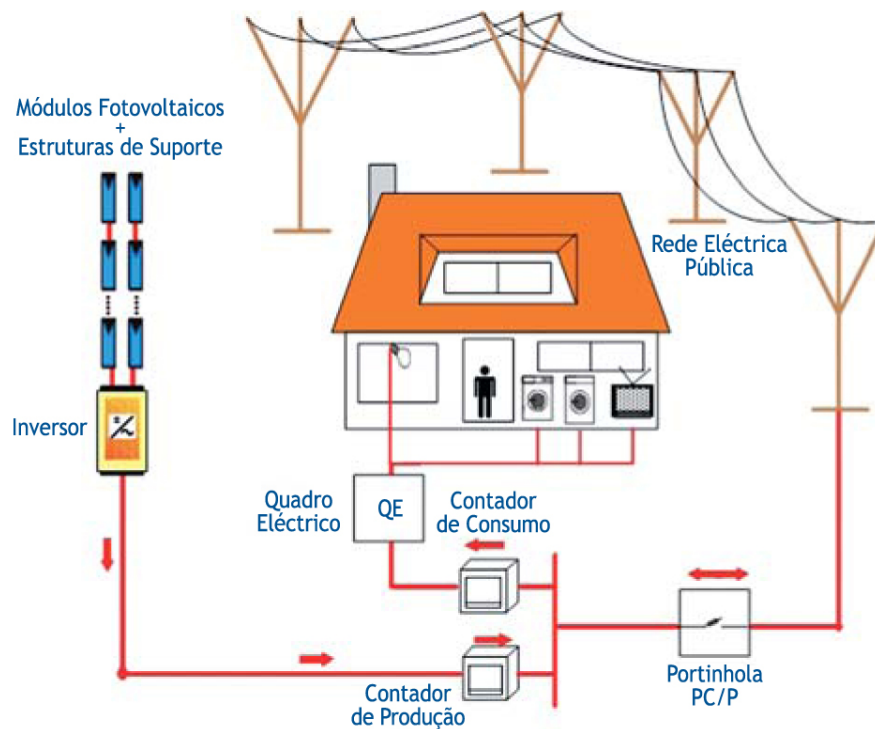


Figura 4.3: Sistema FV ligado à rede; Fonte: [27]

4.3 "Maximum Power Point Tracker" em Sistemas Fotovoltaicos

Como já foi abordado na secção 2.5 neste trabalho, interessa projetar o sistema no seu todo de forma a que este produza sempre a potência máxima possível. Como as condições de exploração deste sistema variam ao longo do dia e também de dia para dia, importa dotar os sistemas de processos que garantam a resposta a essas mesmas variações, de uma forma rápida e eficaz. É nesse contexto que surge o MPPT.

Os MPPT's e os algoritmos que conduzem à procura do MPP podem ser os mais diversos, no entanto, coube a quem fez este trabalho decidir qual o método que melhor respondia às necessidades do sistema. Então, para o sistema FV em causa pensou-se num MPPT que fosse capaz de atuar quando se verificasse uma variação de carga e/ou uma variação das condições das variáveis de entrada no circuito (intensidade luminosa e temperatura ambiente), para além de ter uma implementação relativamente rápida e fácil de entender.

O método usado foi o de "Perturbação e Observação" que consiste em provocar uma anomalia nas condições de funcionamento do sistema e verificar se o MPPT atua de forma a extrair a potência máxima para essas condições. Numa primeira instância importa ter a noção de como é que os sistemas FV reagem a alterações de temperatura ambiente e de irradiância, sendo que para isso se pode observar as figuras abaixo. Em primeiro lugar surgem as curvas I-V para diferentes temperaturas ambientes e irradiância igual a $1000W/m^2$.

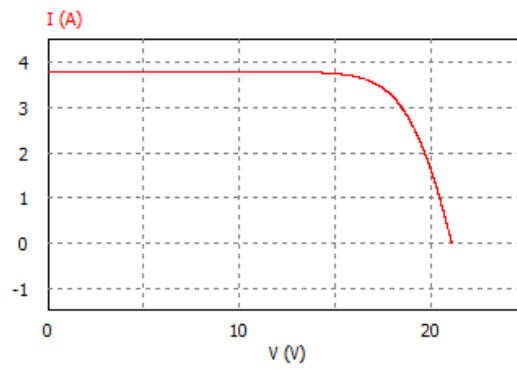


Figura 4.4: Curva I-V para $T = 25^{\circ}C$ e $Int_{luminosa} = 1000W/m^2$

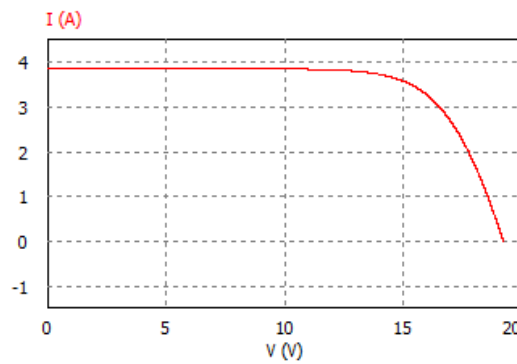
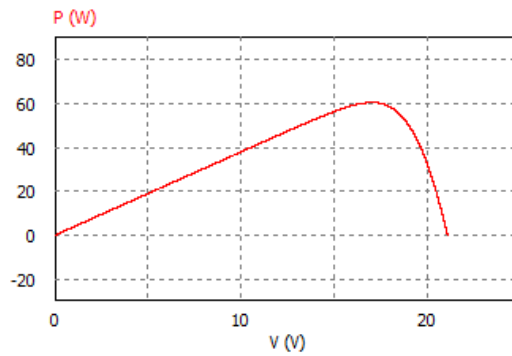
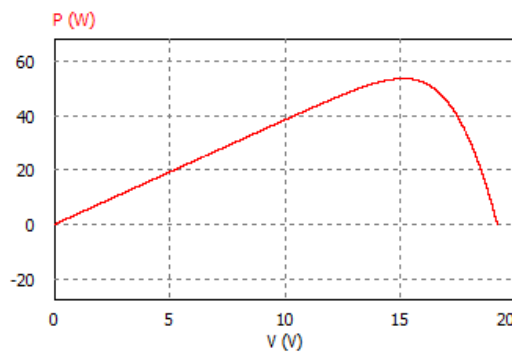


Figura 4.5: Curva I-V para $T = 50^{\circ}C$ e $Int_{luminosa} = 1000W/m^2$

Como se pode ver nas figuras 4.4 e 4.5, as curvas I-V mudam de aspeto quando se modificam as condições de temperatura. No que diz respeito às curvas P-V (potência-tensão) também é possível visualizar alterações nas ondas quando se provocam as mesmas alterações de temperatura.

Figura 4.6: Curva P-V para $T = 25^{\circ}C$ e $Int_{luminosa} = 1000W/m^2$ Figura 4.7: Curva P-V para $T = 50^{\circ}C$ e $Int_{luminosa} = 1000W/m^2$

O mesmo sucede quando se mantêm as condições de temperatura (por exemplo $25^{\circ}C$) e se alteram os valores da intensidade luminosa. Nas figuras abaixo pode-se verificar a diferença nas curvas I-V e P-V se se alterar o valor da irradiação de $1000W/m^2$ (figuras 4.4 e 4.6) para $1200W/m^2$ (figuras 4.8 e 4.9).

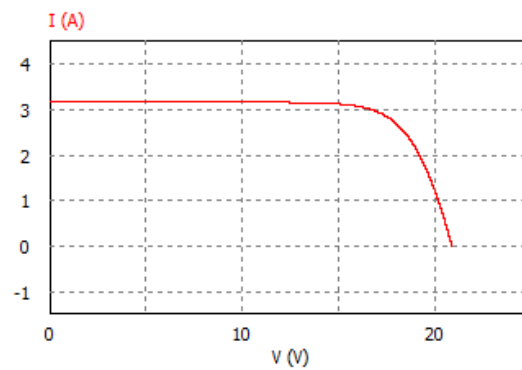


Figura 4.8: Curva I-V para $T = 25^{\circ}C$ e $Int_{luminosa} = 1200W/m^2$

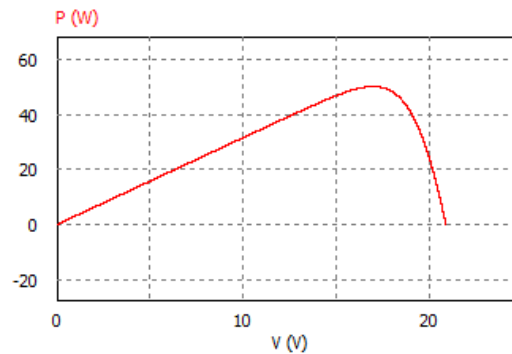


Figura 4.9: Curva P-V para $T = 25^{\circ}C$ e $Int_{luminosa} = 1200W/m^2$

É de acordo com as curvas I-V e P-V para umas determinadas características de temperatura e intensidade luminosa que se define o ponto máximo de potência para o sistema, conforme está representado na figura 2.23 na secção 2 deste documento.

O MPPT tem como entradas a tensão e a corrente de saída do sistema FV. O método baseia o seu estudo no cálculo da potência do painel e as alterações dessa mesma potência, em intervalos constantes, sendo que o MPPT atua quando "vê"essa perturbação. [28]. O MPPT atua por forma a incrementar ou decrementar a tensão do painel. Se uma perturbação provocar um aumento de potência na saída do painel (acima do que se quer), a seguinte terá o sentido contrário fazendo com que a potência baixe.

O modo de funcionamento do MPPT está sob a forma de diagrama na figura 4.10.

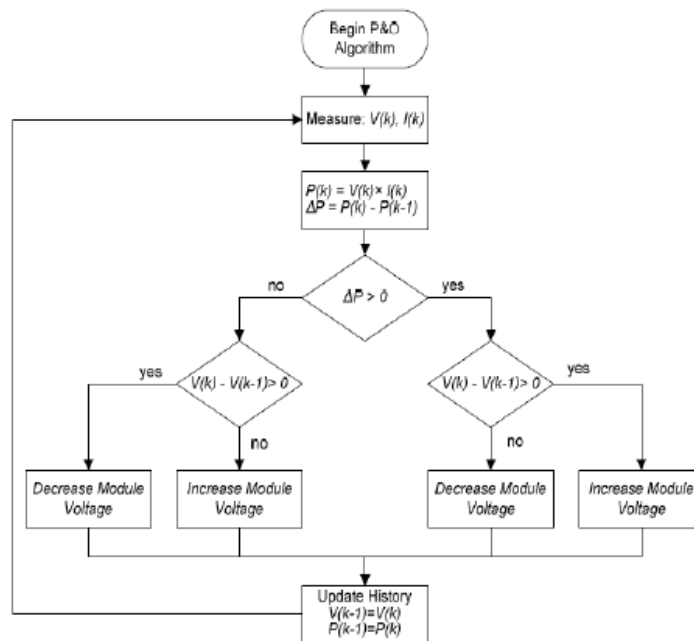


Figura 4.10: MPPT do sistema FV projetado - Fonte:[28]

Numa primeira instância é medida a potência à saída do painel, sendo que depois se verifica se o ponto de funcionamento se encontra na parte crescente ou decendente da curva de P-V (por exemplo 4.9), isto é, se se está no lado esquerdo do MPP ou do lado direito. Consoante o resultado dessa verificação atua-se na tensão de forma a que o sistema tenda sempre a ir para o ponto de máxima potência, isto é, aumentando ou diminuindo o valor do módulo da tensão.

A título de exemplo, imagine-se o sistema da seguinte forma:

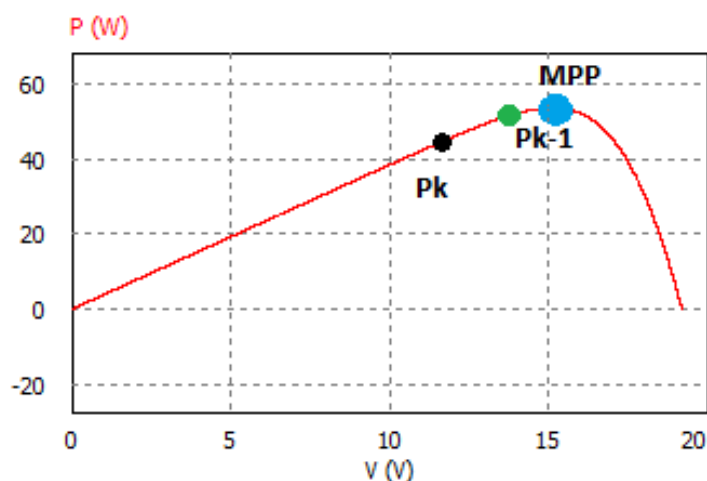


Figura 4.11: Busca do MPP

Para este caso específico, o novo ponto de funcionamento P_k está mais afastado do MPP do que P_{k-1} , logo $\Delta P < 0$ e $V_k - V_{k-1} < 0$. Sendo assim, e com o intuito de se atingir o MPP é necessário atuar na tensão de forma a que se atinja o MPP. Neste caso teria que se aumentar o módulo da tensão (através de um incremento fixo) por forma a aumentar a potência.

Os valores de tensão e potência no final de um ciclo do MPPT correspondem aos valores de entrada do ciclo seguinte. Este processo repete-se continuamente e mediante um intervalo de tempo pré definido pelo utilizador, de acordo com a frequência do próprio MPPT.

De seguida será ilustrado um exemplo prático do controlo do MPPT desenvolvido neste sistema. Neste caso considerou-se uma variação de uma das entradas, a irradiância, que passa dos $1000\text{W}/\text{m}^2$ para os $800\text{W}/\text{m}^2$ após 1 segundo.

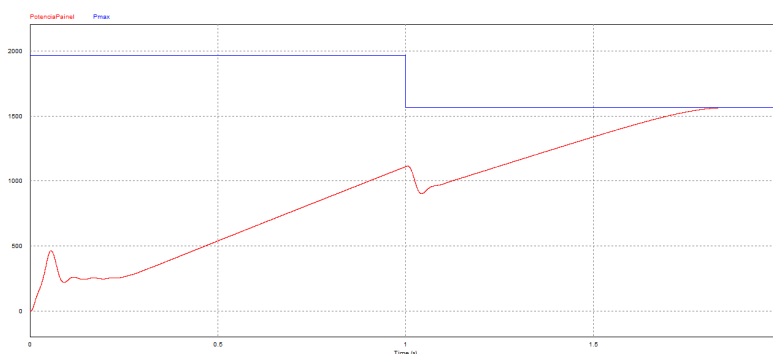


Figura 4.12: Busca do MPP no projeto estudado

Conforme se pode verificar na figura 4.12 o sistema, com recurso ao MPPT, tende a ir buscar o ponto ótimo de funcionamento do mesmo, ou seja, o ponto de funcionamento que corresponde à máxima potência disponível num determinado instante. O sistema MPPT, que usa a tensão

do painel FV como variável de controlo começa desde o instante inicial à procura da potência máxima, que no primeiro segundo de simulação corresponde a 2000 W, não chegando a atingir esse mesmo valor pois foi provocada uma alteração de irradiância para o instante $t = 1$ seg. Por isso mesmo, o sistema FV experimenta uma redução de potência máxima possível (teórica), à qual o MPPT é sensível, isto é, a partir de $t = 1$ seg o MPPT busca não os 2000 W mas sim cerca de 1600 W. Por volta dos 1.7 segundos o MPPT atinge então a potência máxima disponível, pondo o sistema FV a funcionar à máxima potência.

Por forma a melhorar a busca do MPPT pode-se atuar no ganho do PI ou nos parâmetros de frequência do circuito de controlo.

4.4 Conversores *Buck*

Para controlar um circuito como o fotovoltaico normalmente recorre-se a um de dois esquemas gerais de controlo, sendo eles os conversores *booster* e os conversores *buck*. Neste projeto específico optou-se pelo conversor *buck*, apesar da tendência para o futuro ser o uso de conversores *booster*. No entanto, e dada a fácil compreensão e aplicação do modelo *buck*, optou-se pela utilização do mesmo.

Na figura abaixo pode ver-se uma estrutura tipo de um conversor *buck*, que serviu de base para o que foi implementado neste trabalho.

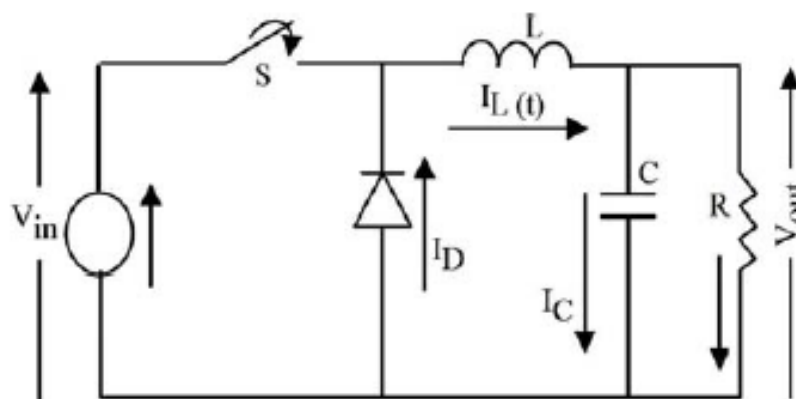


Figura 4.13: Esquema elétrico de um sistema *buck*; Fonte: [29]

Como se pode ver, o circuito do conversor é constituído por dois *switches*, sendo eles o MOSFET e o diodo, um condensador e uma bobina. Para além disso, a resistência que surge na imagem representa a carga do sistema, enquanto que o V_{in} representa a tensão de entrada do circuito de controlo, ou seja, a tensão de saída do painel FV.

O MOSFET é um diodo em anti-paralelo com um transístor. Conduz quando a tensão entre a *gate* e fonte é superior à tensão limiar do dispositivo e fica *off* quando a corrente é nula e a tensão

entre a *gate* e a fonte é inferior à tensão limiar. Quanto ao diodo, este conduz quando a tensão aos terminais é superior à sua tensão limiar, que anda à volta dos 0.7 V.

Quer o MOSFET quer o diodo, estão presentes no circuito por forma a garantir que o fluxo de potência se faz no sentido convencional, isto é, da entrada para a saída.

No que diz respeito ao condensador e à bobine, estes encontram-se no circuito por forma a armazenar a transmitir energia da entrada para a saída

A operação do circuito consiste no seguinte: como já foi dito anteriormente, usa-se a bobine e o condensador como componentes de armazenamento de energia para controlar o trânsito de potência da entrada para saída, abrindo e fechando o *switch*, que normalmente é um componente eletrónico (MOSFET) que atua em dois estados (ON e OFF).

Quando está ON, para um intervalo de tempo $\alpha(T)$, o *switch* conduz e o diodo fica inversamente polarizado. Isto traduz-se numa tensão positiva V_L na bobine, que é igual a $V_{in} - V_{out}$. Esta tensão faz com que haja um aumento linear da corrente I_L . Quando o *switch* passa a estar OFF, a bobine continua a debitar energia durante um intervalo de tempo. Assim, essa corrente flui através do diodo e $V_L = -V_{out}$ durante um intervalo de tempo igual $(1 - \alpha)T$, até que o *switch* esteja ON de novo.

Na figura abaixo surgem as ondas características à entrada e saída do conversor *buck* do sistema FV, isto é, tensão e corrente à entrada e saída dos conversores, de acordo com o esquema da figura 5.1.

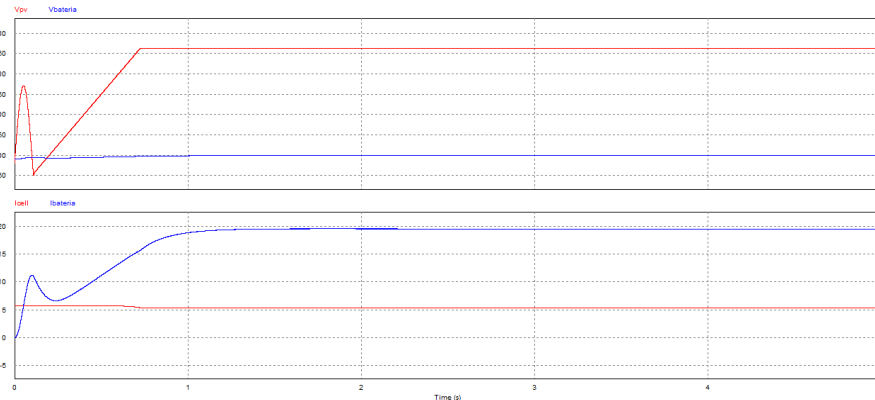


Figura 4.14: Ondas de tensão e de corrente obtidas à entrada e saída do conversor *buck*

As linhas a azul corresponde à tensão e corrente à saída do painel, ou seja, à entrada do conversor, sendo que por seu lado as linhas vermelhas dizem respeito à tensão e corrente à saída do conversor.

A onda "Vout" tem um valor a rondar os 87 volt, isto porque está "limitada" pela tensão da bateria pois no dimensionamento mesma se considerou uma tensão de referência para as baterias no valor de 80 volt. Por seu lado, a corrente "I3" tem o mesmo comportamento da tensão aos terminais do painel "Vpv", sendo que esta última varia pelos motivos enumerados na secção anterior (MPPT em sistemas FV).

Por seu lado, a corrente à saída dos painéis "Icell" tem um valor médio na ordem dos 5.5 A, mantendo-se esse valor praticamente constante ao longo da simulação. Este valor está de acordo com o *datasheet* do produto escolhido a apresentar nos anexos.

4.5 Dimensionamento de Sistemas FV

Na figura abaixo pode ser visualizado um sistema FV tipo ligado à rede elétrica.

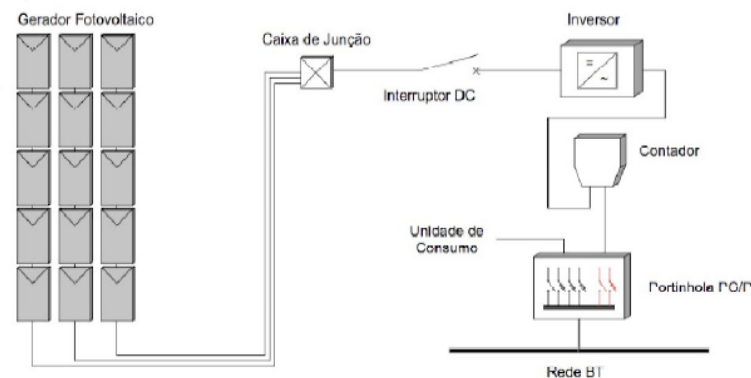


Figura 4.15: Constituição de um sistema fotovoltaico ligado à rede; Fonte: [24]

Um pouco à margem do que foi mencionado na secção referente ao dimensionamento de sistemas eólicos, o mais importante para qualquer instalação é garantir uma perfeita sintonia entre todos os elementos que constituem o sistema.

Num sistema do género e para além dos elementos presentes na figura 4.15, importa ter em atenção outros aspetos essenciais para montar um sistema FV, tais como os reguladores de carga por exemplo.

A ligação dos módulos fotovoltaicos é essencial, sendo possível determinar o número máximo de painéis ligados em série.

$$n_{max} = \frac{V(max)_{inversor}}{Vca(-10^{\circ}C)} \quad (4.1)$$

Onde:

- $V(max)_{inversor}$ é a tensão DC no inversor;
- $Vca(-10^{\circ}C)$ é tensão em circuito aberto do módulo a $-10^{\circ}C$

O número de fileiras também pode ser definido segundo a seguinte expressão:

$$n_{fileiras} < \frac{I_{max}}{I_n} \quad (4.2)$$

Onde:

- I_{max} é a corrente máxima admissível na entrada do inversor;
- I_n é a corrente por fileira de módulos.

Os cabos de fileira também são importantes pois estabelecem a ligação AC entre os módulos FV e a caixa de junção do gerador. São dimensionados de forma a suportar esforços mecânicos mas também as condições ambientais, tendo em conta as condições para as quais se espera que o sistema trabalhe.

Quanto aos reguladores de carga, já mencionados anteriormente, estes são dimensionados de acordo com a tensão dos módulos FV e a corrente dos mesmos. A sua dimensão deve ser superior à corrente total dos painéis interligados entre si [35].

Os fusíveis também são importantes em sistemas com 4 ou mais fileiras. São apelidados de fusíveis de fileira e devem ser incluídos nos circuitos positivos e negativos dos cabos de fileira. A sua utilização não é obrigatória, uma vez que caso o dimensionamento dos cabos de fileira seja bem efetuado não surgirão problemas de corrente ao circuito, no entanto, a sua instalação pode ser benéfica pois trata-se de um equipamento que ajuda a manter o sistema seguro [24].

Outro aspeto importante é o dimensionamento do cabo principal DC que estabelece a ligação entre a caixa de junção do gerador e o inversor. Este cabo, dada a sua importância, deve ser capaz de resistir a todo o tipo de esforços.

Outros componentes, como a caixa de junção geral que liga as diversas fileiras, o interruptor DC que possibilita o isolamento do gerador fotovoltaico de forma manual e os sistemas de proteção de descargas atmosféricas, também assumem um papel de grande importância nos sistemas FV [24].

4.6 Conclusões

Neste capítulo, à semelhança do que se fez no capítulo 3 com o sistema eólico, dá-se a conhecer uma vertente mais técnica dos sistemas FV. Fala-se das aplicações como forma de contextualizar o sistema FV projetado, abordam-se os sistemas isolados ou ligados à rede, os conversores *buck* que estão associados ao sistema FV, o algoritmo do MPPT no sistema FV e alguns aspetos relevantes para o dimensionamento de sistemas FV. Estes assuntos são essenciais para uma melhor percepção sobre os sistemas FV e todas as vertentes associadas aos mesmos.

Capítulo 5

Projeto do Sistema Global (Eólico e FV)

Um dos objetivos deste projeto passa por interligar a produção fotovoltaica com a produção eólica. O facto do sistemas produtor ser constituído por um sistema produtor eólico e outro fotovoltaico faz com que seja muito mais provável que a carga seja satisfeita, uma vez que o consumo não dependerá apenas de um sistema produtor mas sim de dois, aumentando assim a probabilidade da procura de alimentação de cargas ser satisfeita pela produção.

Para este caso concreto pensou-se num sistema produtor com capacidade (10 kW de eólica e 2 kW de FV), bem superior à potência exigida pela carga (secção 5.3), no entanto é necessário perceber que a potência máxima do sistema produtor apenas se verifica para as condições ideais, que raramente acontecem em simultâneo.

Ao longo deste capítulo abordar-se-á a metodologia seguida ao longo da tese no que toca à elaboração da simulação do sistema, os resultados obtidos para o sistema FV, eólico e para o Modelo Geral, será também feita a análise dos consumos de uma moradia e das previsões de produção eólica, bem como o cálculo das baterias para o sistema. Por fim são apresentadas as conclusões deste capítulo.

5.1 Metodologia

O trabalho foi organizado de forma a que se pensasse num sistema produtor capaz de alimentar uma determinada carga, neste caso uma moradia unifamiliar. Então, tendo em consideração um diagrama de cargas presente na secção 5.3, procurou-se projetar um sistema capaz de alimentar as necessidades de carga e que além disso fosse capaz de produzir energia para fornecer à rede, com vista a obter fins lucrativos com isso.

Surgiu então a ideia de pensar, numa primeira instância, nos sistemas produtores de forma independente. Começou-se pela projeção do sistema FV, com todas as vertentes associadas ao mesmo, como os tipos de painéis a implementar e as características dos mesmos, a parte de controlo do sistema (se se usaria conversores do tipo *Buck* ou *Booster*) e também a bateria associada ao próprio sistema.

Quer para o sistema FV quer para o eólico, optou-se por recorrer ao PSIM para efetuar a simulação dos sistemas, uma vez que este *software* possui uma vasta gama de recursos para simulação de circuitos eletrónicos e aliado a isso apresenta também uma interface bastante intuitiva.

Recorreu-se aos modelos de simulação que o PSIM possui no que se refere a sistemas de energia renovável, quer do ponto de vista do sistema produtor eólico, quer do sistema fotovoltaico. Esse aspeto revelou ser bastante importante no desenrolar do projeto uma vez que os sistemas disponibilizados já se encontravam dimensionados para umas determinadas condições, poupando assim algum tempo precioso. Coube então ao utilizador do programa alterar as condições e características dos sistemas tendo em conta aquilo que pretendia, aproveitando apenas o que interessava nos modelos disponibilizados em PSIM.

O PSIM possui alguns modelos de simulação para sistemas eólicos, sendo que a maior variante de uns para outros é o tipo de gerador que usam. Assim, como se percebe ao longo deste documento, o gerador escolhido foi o de indução em gaiola de esquilo (SQIG), pelo facto de ser fiável, robusto, eficiente e com baixos custos de manutenção quando comparado com outras máquinas (ver ponto 2.1.2). A parte de controlo do sistema com um SQIG é semelhante ao que sucede para outro tipo de geradores, sendo que esta vertente também já se encontra pré-definida pelo próprio PSIM.

A fase final consistiu em juntar o sistema eólico e o fotovoltaico num só, verificando se o sistema responderia bem a alterações que pudessem surgir.

Considerou-se um sistema FV composto por 10 painéis com potência de 200 W cada (2 kW no total) e uma turbina eólica de potência nominal 15 kW. Os *datasheet* dos equipamentos encontram-se em anexo.

5.2 Modelo PSIM e Resultados

Nesta secção serão apresentados os sistemas dimensionados, onde será possível visualizar os modelos elaborados em PSIM e os resultados associados aos mesmos.

Os modelos serão apresentados segundo a mesma ordem que foram projetados, ou seja, em primeiro lugar o sistema fotovoltaico, depois o eólico e por fim o sistema em conjunto. Os parâmetros dos subsistemas são preenchidos consoante os *datasheet* de fabricantes, sendo que depois, as variáveis de entrada dos sistemas são modificadas de acordo com os testes que se queiram fazer aos sistemas.

5.2.1 Sistema FV

Na figura abaixo surge o sistema fotovoltaico desenvolvido em ambiente de simulação PSIM. Uma vez que este sistema depende diretamente da irradiância e da temperatura ambiente, é nestas variáveis que se deve atuar quando se pretende testar vários cenários de funcionamento.

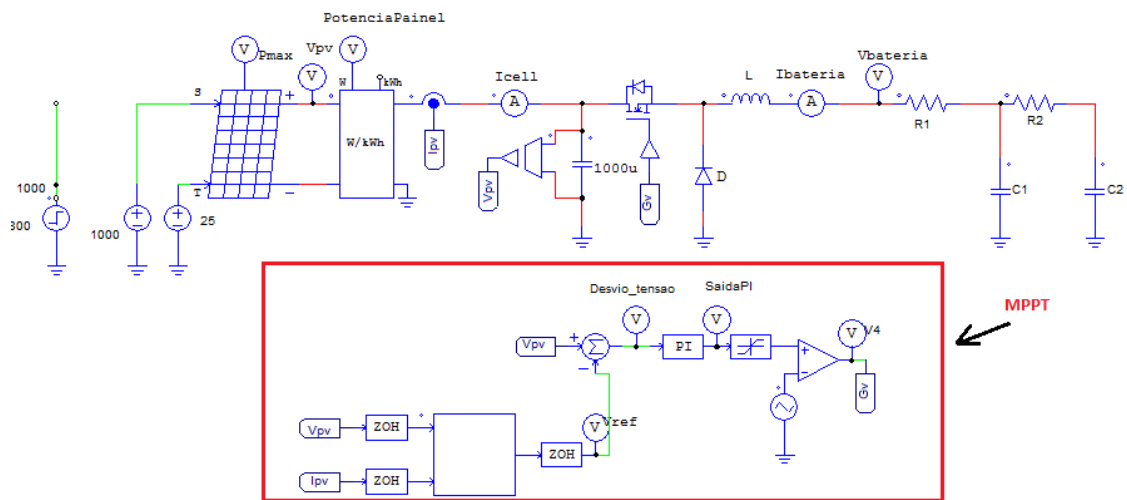


Figura 5.1: Esquema de simulação em PSIM para o Sistema Fotovoltaico

O sistema ilustrado acima é o sistema FV, que está montado de acordo com a estrutura já mencionada anteriormente neste documento. Para além do sistema FV em si, o segundo circuito presente na imagem (parte inferior da mesma), diz respeito ao controlo do MPPT, também já explicado anteriormente neste documento. O sistema FV em causa é composto por 10 painéis FV. Como cada painel debita uma potência na ordem dos 200 W mediante condições ideais, o conjunto de painéis debitaria portanto 2000 W, teoricamente.

Na figura abaixo surge representado o comportamento de um sistema FV perante um dada irradiância e temperatura ambiente, neste caso para uma irradiância igual a $1000W/m^2$ e temperatura ambiente de $25^{\circ}C$, ou seja, as condições ideais de acordo com o *datasheet*.

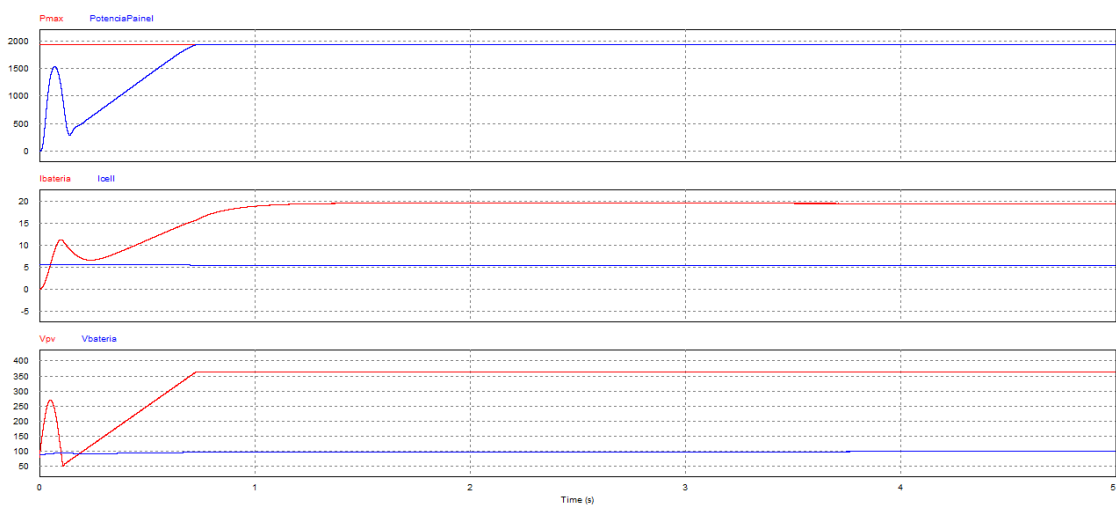


Figura 5.2: Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema FV montado com irradiância igual a $1000W/m^2$

A figura acima ilustra as curvas que permitem caracterizar o comportamento do sistema FV no sistema. As curvas "Pmax" e "PotenciaPainel" dizem respeito ao controlo MPPT do FV explicado no capítulo anterior, onde "Pmax" é a potência máxima que o sistema pode debitar teoricamente e "PotenciaPainel" é a potência efetivamente produzida, verificando-se assim que o controlo MPPT tem sucesso. Quanto às curvas "Vout" e "Vpv", estas correspondem às tensões medidas à saída e à entrada do conversor respetivamente, em que se pode verificar que "Vout" é praticamente constante ao longo de tempo uma vez que "acompanha" a tensão exigida pelas baterias (dimensionadas para 90 volt neste caso concreto) e "Vpv" acompanha a evolução da curva da "PotenciaPainel", isto porque é através de "Vpv" que o controlo do MPPT é feito. No campo das correntes do sistema FV, "Icell" está limitada ao valor do *datasheet* dos painéis usados e evolui de acordo com a potência a extrair ao painel. Quanto a "I3", que é a corrente que segue para a carga, esta tem o mesmo comportamento que "Vpv", sendo que esta tende a diminuir o seu valor à medida que a tensão aos terminais da bateria aumenta.

Este comportamento das ondas de tensão e corrente justifica-se pelo facto do conversor ser do tipo abaixador, isto é, como a tensão à saída do conversor é imposta pela bateria e tem um valor inferior à tensão à entrada terá que ser mais baixa que a tensão à saída.

De reparar que a partir de um certo instante a corrente na bateria começa a baixar e a tensão sobe, isto porque é atingido o valor máximo da tensão nos painéis (de acordo com o *datasheet*).

A fim de testar o comportamento do sistema FV dimensionado a outras variações das condições de entrada, supõe-se então um novo valor para a irradiância, neste caso $800W/m^2$. Fruto dessa redução de a intensidade luminosa, o sistema FV não será capaz de ter uma potência à saída da mesma ordem que o caso anterior, sendo esta nova potência mais baixa. Na figura seguinte mostra-se o comportamento do sistema FV nessa situação:

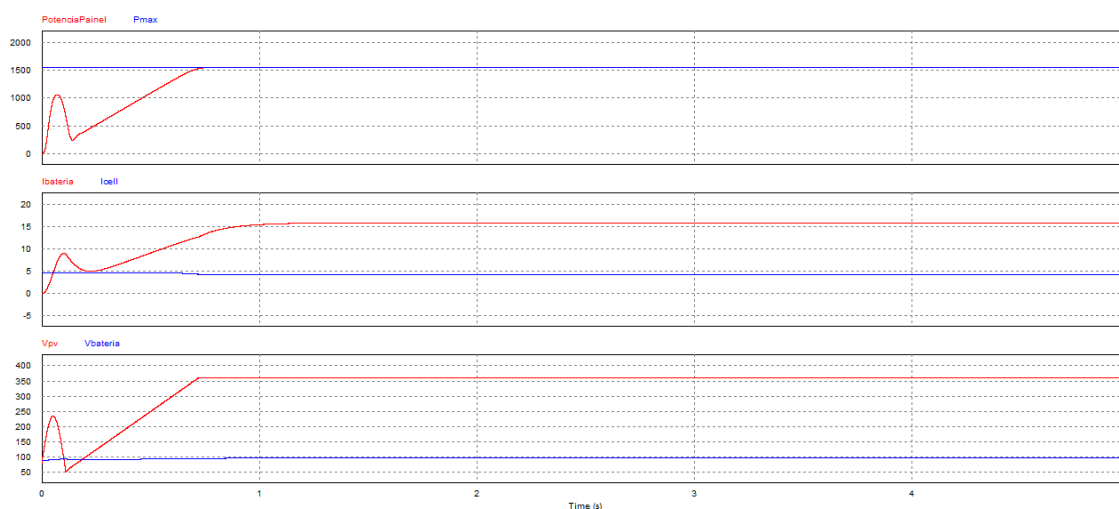


Figura 5.3: Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema FV montado, com irradiância igual a $800W/m^2$

Verifica-se que o sistema se conforme de forma muito semelhante ao observado em 5.2, sendo que como muda o valor da potência à saída do painel dos restantes parâmetros também diminuem.

Se se alterar o valor da temperatura ambiente aumentando-a, o sistema FV acusará esse aumento diminuindo o valor da potência à saída, isto para uma irradiância com valor igual a $1000\text{W}/\text{m}^2$. A figura seguinte ilustra isso mesmo.

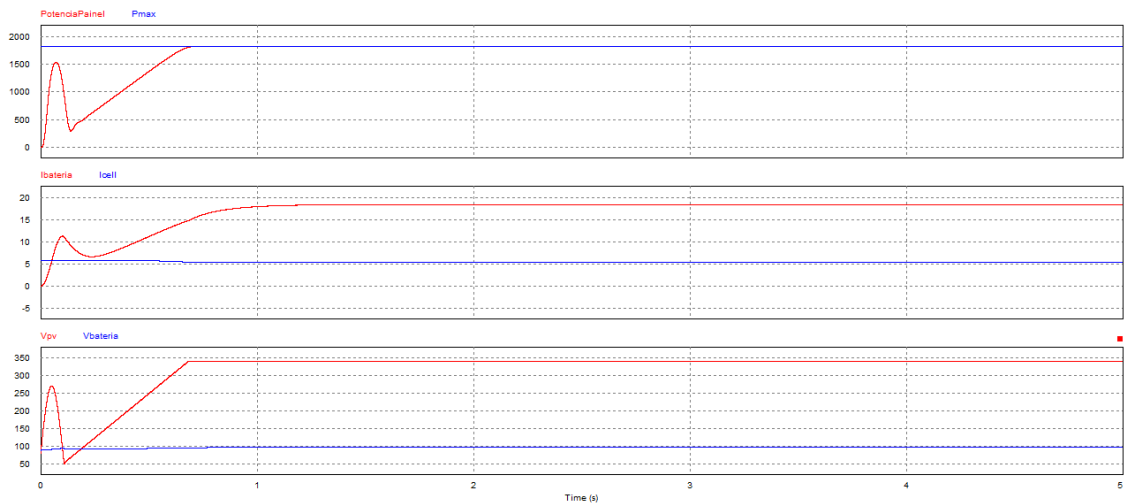


Figura 5.4: Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema FV montado, com temperatura ambiente igual a 40°C

Conforme se observa na figura acima, a potência dos painéis diminui comparativamente com a potência máxima disponível (teórica) por culpa do aumento da temperatura ambiente. Quanto às restantes curvas, apresentam o aspeto semelhante ao verificado em casos anteriores.

Por fim pretende-se demonstrar o comportamento do sistema FV quando sujeito a uma variação de temperatura e de intensidade luminosa na mesma simulação. Surge então a figura seguinte (fig:5.5), onde para $t = 1$ seg se faz a alteração da temperatura de 25 para 40 graus e da irradiância de 1000 para $800\text{W}/\text{m}^2$.

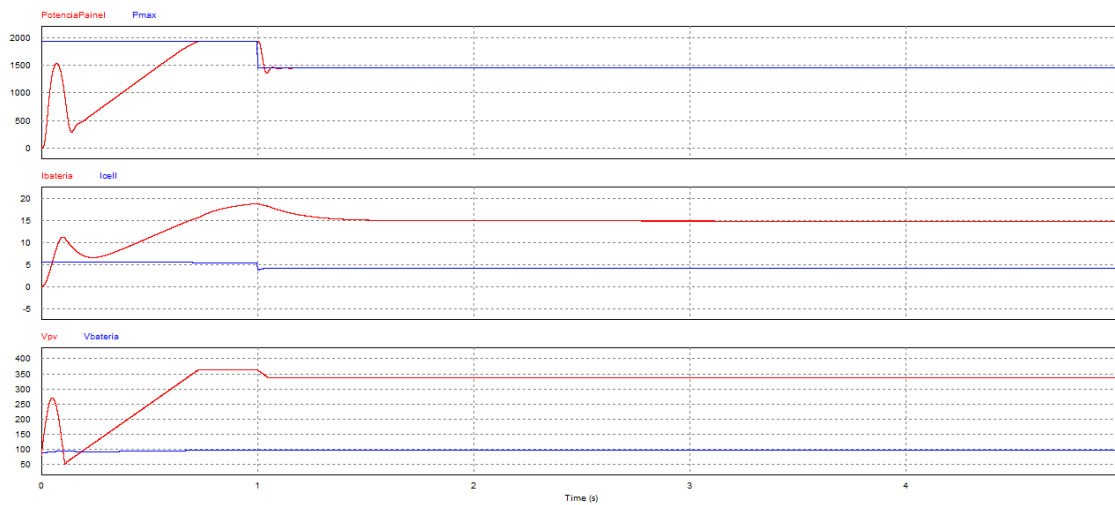


Figura 5.5: Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema FV montado, com variação de temperatura e irradiância

Apesar de ocorrerem duas alterações nas variáveis de entrada em simultâneo o sistema consegue reagir positivamente, obtendo-se o MPP pouco depois do 1º segundo.

5.2.2 Sistema Eólico

Quanto ao sistema eólico, este apresenta uma maior dimensão comparativamente com o FV, dada a sua maior complexidade quer do ponto de vista do modelo da turbina e do gerador, quer da parte do controlo do sistema.

A figura 5.6 representa o sistema eólico montado em PSIM, modelo que contém o SQIG e toda a parte de controlo do sistema eólico do lado da geração e da rede, para além do modelo turbina eólica.

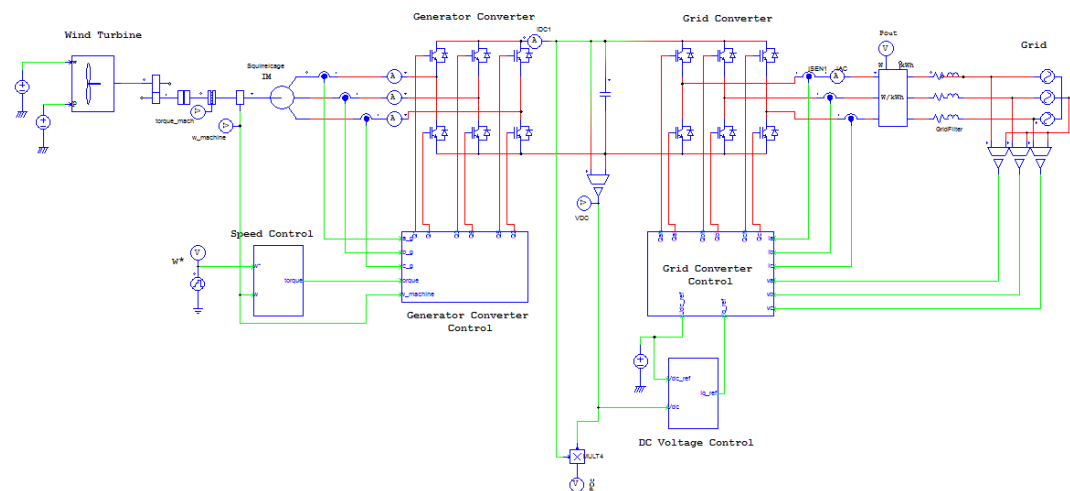


Figura 5.6: Esquema de simulação em PSIM para o Sistema Eólico

Este sistema tem na turbina a sua fonte de energia. A turbina aproveita a energia cinética dos ventos aproveitando-a para produzir energia.

Tem como variáveis de entrada a velocidade do vento em m/s e o *blade pitch* (inclinação das pás do rotor) em graus.

Abaixo e como forma de teste ao modo de funcionamento do sistema, são mostradas as curvas de binário motor ("*BinarioMotor*"), velocidade de rotação da turbina ("*V_rotacao*") e a potência à saída do sistema eólico ("*PsaidaSistema*"). Considera-se uma turbina com potência nominal de 15 kW e para uma velocidade nominal do vento de 12 m/s.

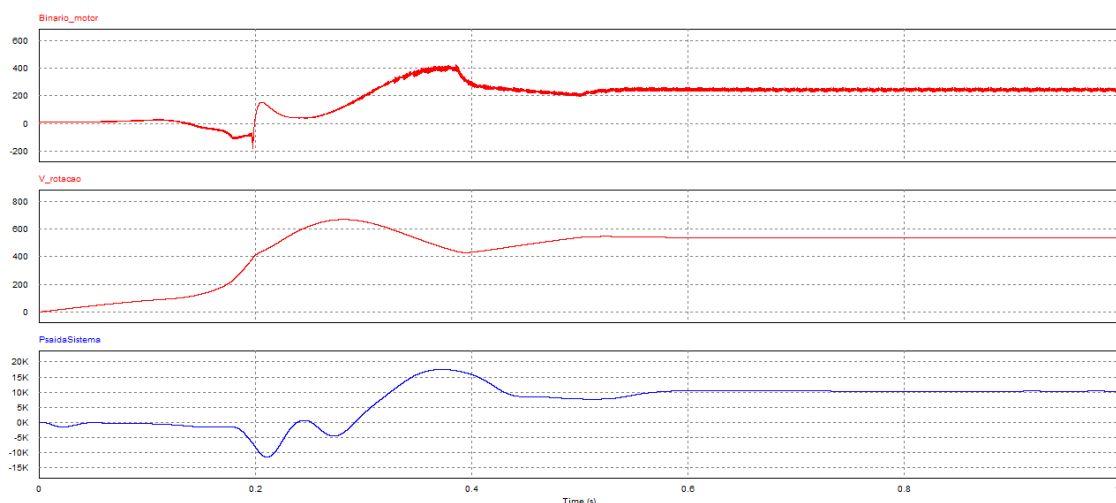


Figura 5.7: Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema eólico montado

Analisando a figura acima, verifica-se que para o instante temporal $t \approx 0.2$ seg o sistema está a receber potência da rede, sendo que nesse instante o binário desenvolvido pela máquina é negativo.

Após se atingir a estabilidade em termos de potência, verifica-se que o binário motor e a velocidade de rotação também estabilizam, como é de esperar, visto que:

$$P_{sist} = T_{sist} \times V_{sist} \quad (5.1)$$

Onde P_{sist} é a potência de um sistema, T_{sist} é o binário do sistema e V_{sist} é a velocidade de rotação do sistema em causa.

No caso de se alterar apenas o ângulo de inclinação das pás (*bladepitch*), mantendo os restantes parâmetros conforme o caso anterior, as formas de ondas obtidas para o sistema eólico foram as seguintes:

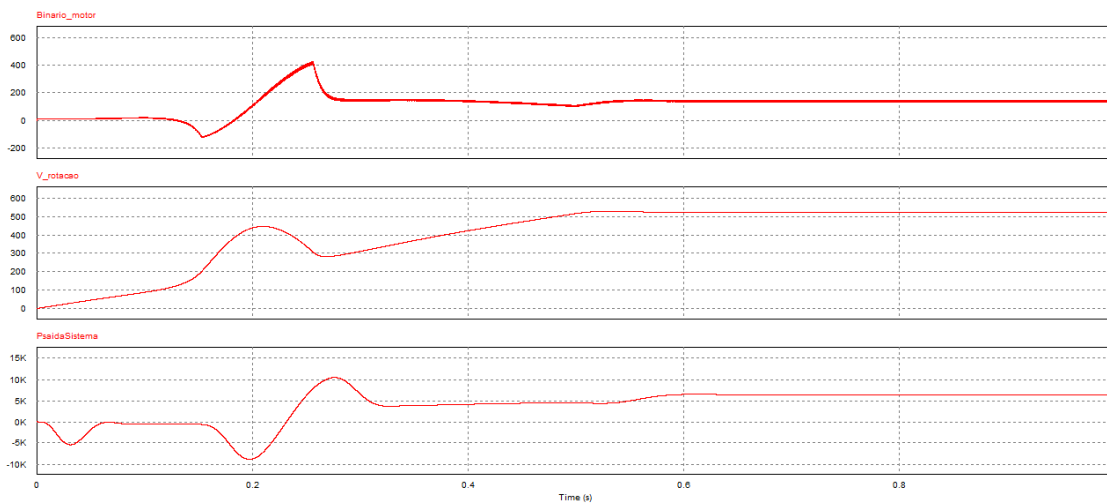


Figura 5.8: Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema eólico montado com *bladepitch* igual a 10 graus

Passando o valor da inclinação das pás de 0 para 10 graus, verifica-se que a potência à saída do sistema diminui. Por seu lado e como era de esperar, a potência e o binário também diminuem.

Isto explica-se pelo facto do *bladepitch* ter influência direta na forma de como se aproveita a energia do vento. Em certas instalações e quando o vento está demasiado forte, recorre-se aos mecanismos que ajustam a inclinação das pás por forma a que a turbina não aproveite a força dos ventos e como tal a potência tenda para o valor nula. Assim como já foi explicado no capítulo 3 na secção referente às ações aerodinâmicas, a inclinação das pás tem influência na força que estas sofrem, assim como a potência à saída do sistema eólico. A inclinação ótima para as pás depende da direção do vento, sendo que atualmente existem mecanismos que controlam o ajuste das pás tendo em conta a direção e velocidade do vento, de forma automática.

Ao assumir que o BP é zero, está-se a assumir que o sistema eólico não está dependente das variações de força aplicadas às pás, estando assim o seu modo de funcionamento dependente apenas da velocidade do vento.

Outro cenário passível de ser verificar na realidade é um decréscimo da velocidade da velocidade do vento para um dado instante. Neste caso testar-se-á a reação do sistema eólico à variação

da velocidade do vento de 12 m/s para os 10 m/s. O cenário esperado é que a potência à saída baixe, de acordo com aquilo que já foi mencionado ao longo do documento. Na figura abaixo surge a figura representativa do sistema nessa situação.

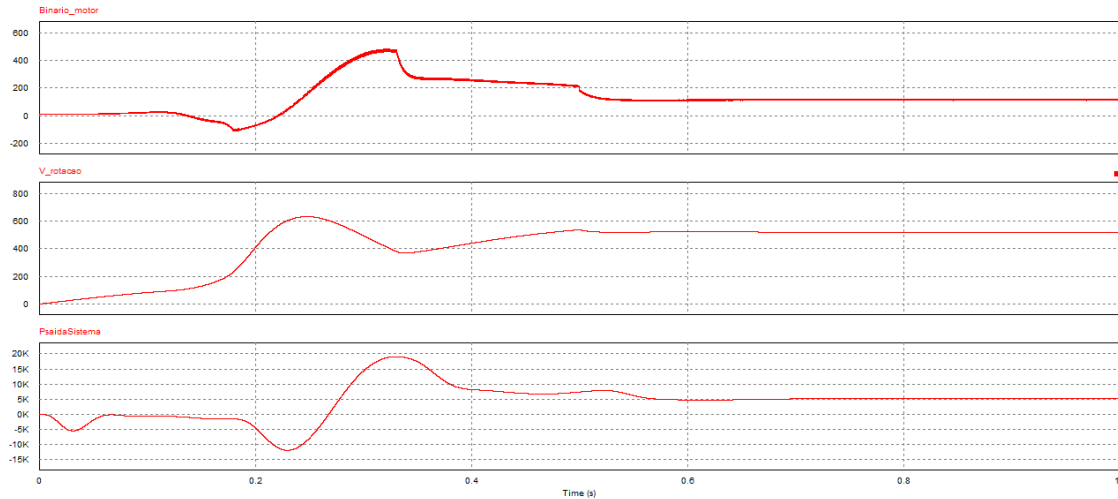


Figura 5.9: Curvas obtidas no modelo PSIM para o sistema eólico montado

Comparando a imagem acima com a figura 5.7, verifica-se que a potência à saída do sistema é menor isto porque o sistema experimenta uma redução de velocidade do vento dos 12 para os 10 m/s, aos 0.5 segundos. No entanto, em termos de estabilidade o sistema continua a reagir de forma estável.

5.2.3 Sistema Geral

O sistema no seu todo não é nada mais que o aglomerado dos dois subsistemas anteriormente representados. De notar que a bateria do sistema, considerada na figura 5.1 encontra-se incluída também no sistema global como não poderia deixar de ser.

Passamos então à representação do sistema no teu todo, presente na figura 5.10.

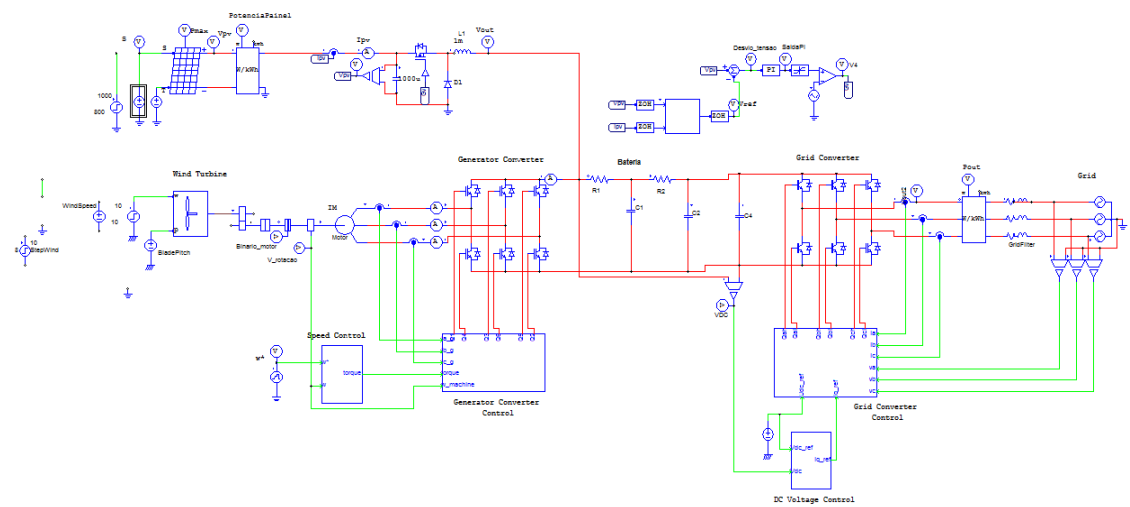


Figura 5.10: Esquema de simulação em PSIM para o Sistema Geral

De seguida será demonstrada a resposta do sistema geral apresentado em termos de potência à saída do próprio sistema, que é o que efetivamente interessa ao produtor. O valor de potência do sistema geral é obtido tendo em conta uma irradiância de $1000W/m^2$, temperatura de $25^\circ C$, velocidade do vento a 12 m/s e *bladepitch* igual a zero, visto que estas são variáveis do sistema geral montado. Esses valores para as variáveis de entrada são os valores nominais, ou seja, de acordo com os *datasheet* são estes os valores de base para os sistemas.

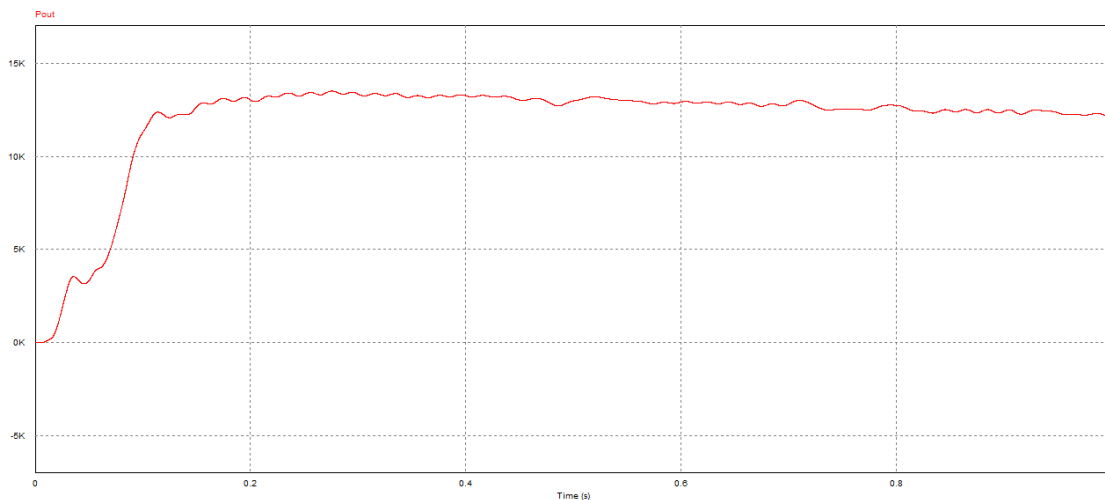


Figura 5.11: Curva de potência obtido para o Sistema Geral montado

Conforme se pode verificar pela figura 5.11, o sistema apresenta estabilidade do ponto de vista de potência à saída, o que vem em contra daquilo que é pretendido. O valor da potência tende para os 12 kW ao longo do tempo, valor esse que resulta essencialmente da soma dos 10 kW do sistema eólico representado anteriormente mais os 2 kW do sistema FV.

Outro assunto que se pode testar é se o sistema reage bem a uma variação de carga. Sendo assim, na figura abaixo está ilustrado o comportamento do sistema geral à inclusão de uma carga, que é colocada em paralelo com a bateria já presente no circuito, conforme está ilustrado na fig 5.13.

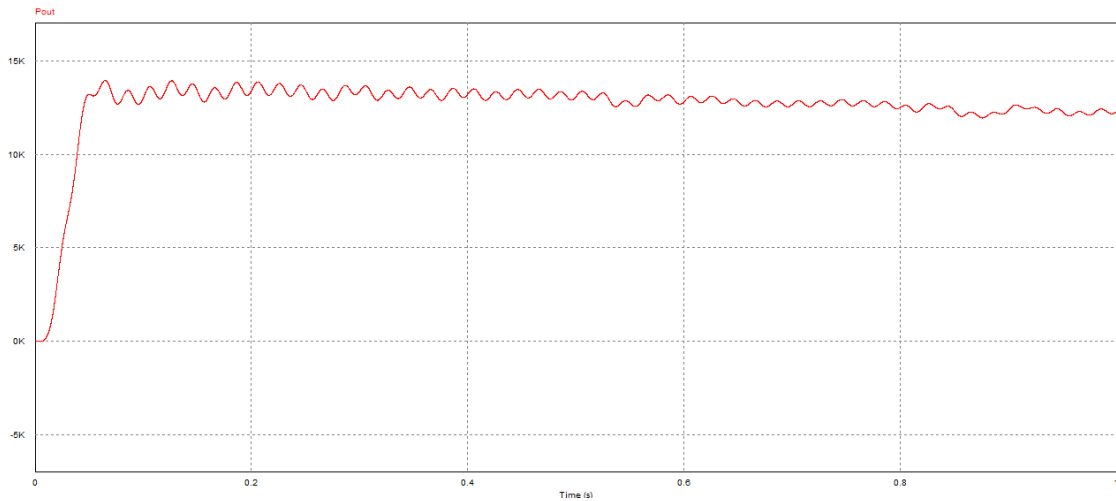


Figura 5.12: Curva de potência obtido para o Sistema Geral montado com carga incluída

Comparando as duas figuras anteriores percebe-se que o facto de incluir uma carga no sistema em nada altera o comportamento deste, mantendo o valor da potência à saída na mesma gama de valores nas duas simulações.

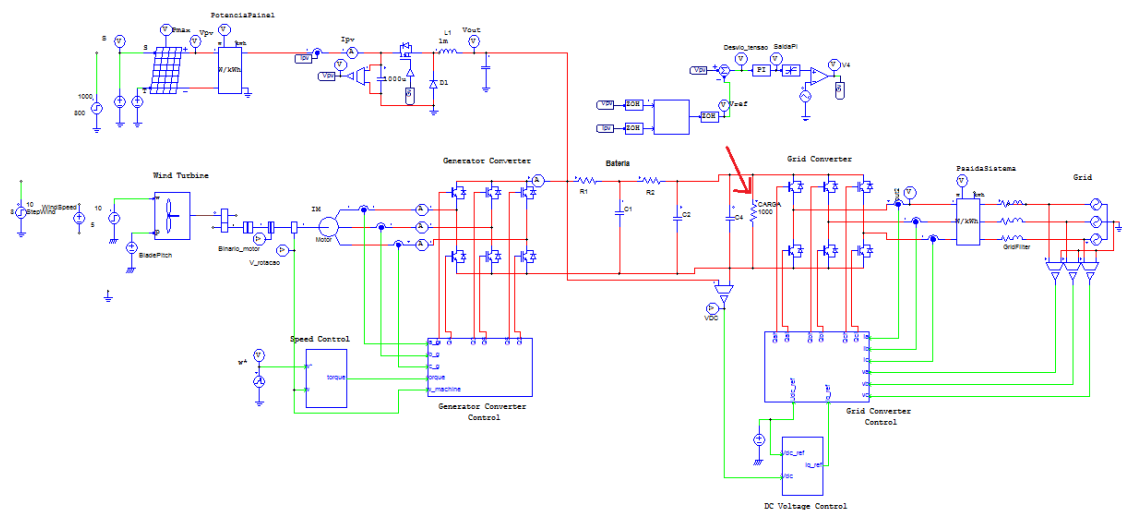


Figura 5.13: Esquema de simulação em PSIM para o Sistema Geral com carga em paralelo com a bateria

5.3 Previsões

5.3.1 Previsão do consumo da moradia

Quando se procura dimensionar um sistema produtor tem que se ter em conta as necessidades de consumo que terão que ser satisfeitas. Neste caso os consumos dizem respeito a uma moradia unifamiliar cujo diagrama de cargas está representado mais abaixo.

Importa referir que este diagrama surge apenas como um exemplo para este projeto, uma vez que os consumos variam de habitação para habitação.

Consoante os consumos da habitação, pensou-se num sistema produtor, eólico e FV no caso, capaz de produzir energia por forma a alimentar a habitação para qualquer cenário de produção (muita/pouca energia solar ou eólica produzida num determinado momento) e também com a possibilidade de vender energia à rede elétrica. A venda de energia surge como um fator determinante na projeção deste trabalho, uma vez que o torna mais viável do ponto de vista económico. No seguimento do que vem sendo falado surge na figura abaixo uma representação do diagrama de cargas considerado para a moradia, baseado em cálculos efetuados para os dados da tabela 5.1 e de acordo com um cenário pensado para um dia normal de Verão.

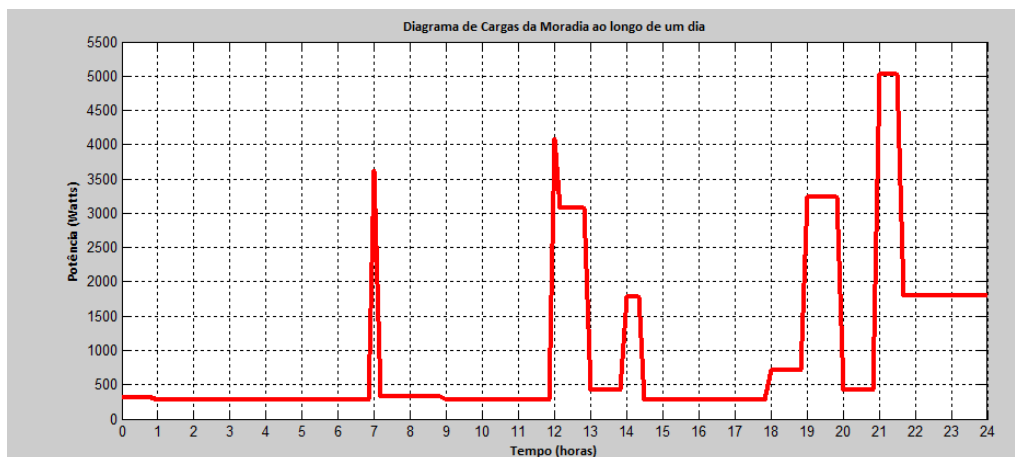


Figura 5.14: Diagrama de cargas diário da moradia

Tabela 5.1: Tabela que serviu de base à construção do diagrama de cargas diário

Componentes	Quantidade	Consumo energético (Potência média em W)
Lâmpadas	25	5
Placas	1	2500
Forno	1	1300
Frigorífico	1	80
Arca	1	200
TV	2	100
Rádio	1	15
Computador	2	150
Micro-ondas	1	1000
Exaustores	1	150
Máquina de lavar louça	1	1500
Máquina de lavar roupa	1	1800
Ferro elétrico	1	1000
Torradeira	1	800

Como se pode ver pela figura 5.14, o pico de potência ronda os 5000 W para um instante temporal à volta das 21h00. Como será possível perceber mais à frente (secção 6.3) e de acordo com aquilo que já foi mencionado, o sistema produtor projetado tem a capacidade de produzir instantaneamente uma potência bastante superior ao pico da carga, no entanto, essa potência apenas será produzida segundo condições de vento e sol ideais.

5.3.2 Previsões de produção eólica

A previsão de produção pode ter um papel importante quando se pretende dimensionar um sistema produtor renovável. Ao contrário do que sucede com as fontes de energia convencionais, as fontes produtoras que recorrem às energias renováveis dependem diretamente da disponibilidade do recurso em cada momento. É com esse intuito que se recorrem a modelos de previsão, para poder estimar a produção dos sistemas mediante determinadas condições que se verifiquem numa dada altura, neste caso de vento e sol.

Neste trabalho o modelo de previsão estudado foi a rede neuronal, que é um método bastante rápido e que nos permite obter bons resultados das previsões. No entanto, foi apenas testada a previsão de energia eólica dada a disponibilidade limitada de dados, sendo que para o caso da previsão de potência FV produzida o processo é em tudo semelhante ao da eólica, alterando obviamente as variáveis de entrada da RN.

Quanto maior for a quantidade de dados que se possui e menor for a variação dos valores ao longo do tempo, maior será a precisão das previsões associadas à RN. Neste caso, os dados "treinados" dizem respeito ao mês de Fevereiro de 2005 para um determinado local. Dentro das variáveis de estado presentes nesses dados históricos, escolheu-se a velocidade do vento e a direção do vento, que funcionaram como *inputs* da RN.

As redes neurais são usadas normalmente quando se possui uma vasta gama de dados sobre um acontecimento, em que se conhece os *inputs* e os *outputs*, mas não se conhece a relação entre a entrada e a saída da própria rede. Então, o que a rede neuronal faz é estabelecer uma relação entre os *inputs* e os *targets*. Depois de estabelecida essa relação, pode-se testar a rede neuronal, colocando valores de *inputs* e a rede devolve a sua previsão.

Basicamente o modelo das redes neurais é constituído por uma camada de *inputs* (entradas), conjunto de neurónios e os *outputs* (camada de saída). Podem ser constituídos por uma camada de neurónios, ou várias. As redes neurais podem ser de dois tipos, as unidireccionais (*feed-forward*) e as recorrentes (*feedback*). O tipo mais utilizado são as unidireccionais, onde não ocorre realimentação, funcionando assim de forma progressiva a rede.

Outro processo importante nas RN é o treino, que consiste na descoberta dos pesos da função de transferência, ou seja, os parâmetros que interligam as entradas e as saídas da rede neuronal.

Recorreu-se ao MATLAB para simular a rede neuronal, de acordo com dados adquiridos sobre velocidade e direção do vento num local e potência eólica efetivamente produzida nesse local.

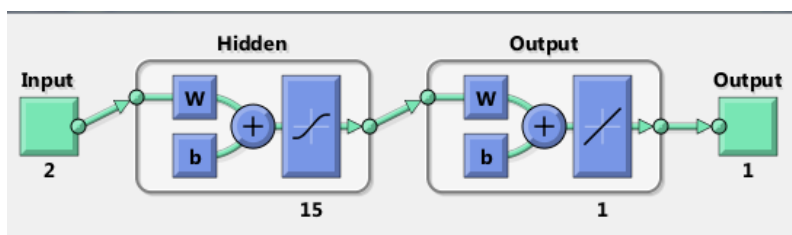


Figura 5.15: Esquema da rede neuronal para previsão de Energia Eólica num local

Na figura seguinte é ilustrado o resultado das previsões de energia eólica para alguns instantes "n" ao longo do tempo "t". No entanto estes dados dizem respeito a uma amostra muito curta, sendo que se a amostra fosse maior a qualidade da previsão também tenderia a ser melhor.

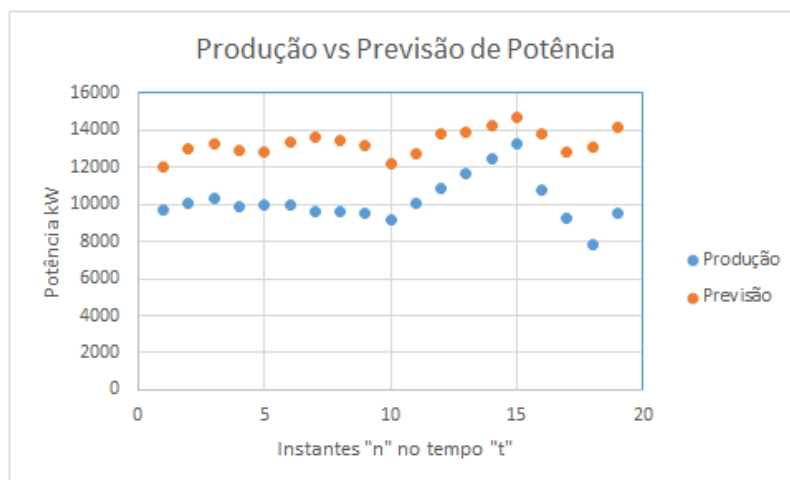


Figura 5.16: Comparação entre a produção efetiva e as previsões

De acordo com a imagem acima é possível ver a proximidade dos dados referentes à produção efetiva num local e os dados da previsão obtidos através da implementação de uma rede neuronal em MATLAB. Os dados das previsões, apesar de estarem com valores próximos poderiam estar mais próximos caso a amostra fosse maior.

Nesta secção pretende-se apenas demonstrar a utilidade associada às redes neuronais, neste caso concreto para sistemas eólicos. Este conjunto de mecanismos pode ser utilizado noutras áreas, sendo que o interesse desta explicação consiste em mostrar em que medida é que as previsões de produção, nomeadamente através das RN, são uma ferramenta bastante útil para a projeção de sistemas renováveis idênticos àquele foi abordado ao longo deste documento.

5.4 Cálculo das Baterias

Nesta secção mostra-se como se dimensionaram as baterias para o sistema, baterias essas que terão de ser capazes de armazenar energia para o sistema e fornecer a mesma em condições ideais.

Na figura 5.17 surge representado o sistema de baterias:

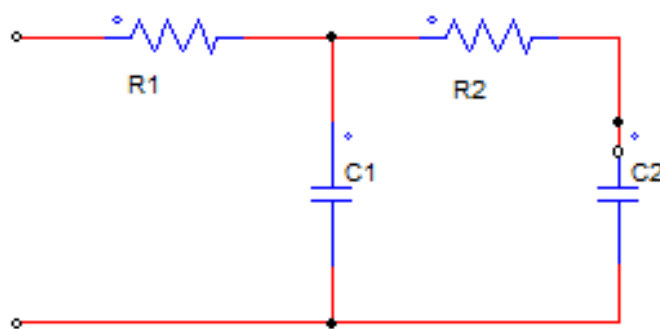


Figura 5.17: Bateria para o sistema em causa

Dimensionamento dos condensadores C1 e C2

Considerou-se que as baterias apresentam uma gama de tensões entre os 3.2 V e os 3.7 V, ou seja, com valor médio de 3.45 V, ao que corresponde uma corrente com valor igual a 10 Ah.

Se se pretender ter uma tensão de 300 V na bateria serão necessários n elementos, dados pela seguinte equação:

$$n_{\text{elementos}} = \frac{V_{\text{req}}}{V_{\text{bateria}}} = \frac{300}{3.45} \approx 87 \quad (5.2)$$

Tendo em conta que a fórmula geral para o cálculo da energia (E) é:

$$E = U \times I \times \Delta T \quad (5.3)$$

Onde:

- U é a tensão (V);
- I é a corrente (A);
- ΔT é o intervalo de tempo

E que a energia num condensador é dada por:

$$E_{condensador} = \frac{1}{2} \times c \times v^2 \quad (5.4)$$

Onde:

- c é a capacidade da bateria (F);
- v é a tensão aos terminais da bateria (V);

Igualando uma expressão à outra vem que:

$$\frac{1}{2} \times c \times V^2 = U \times I \times \Delta T \quad (5.5)$$

Chegando-se ao valor de $C = 20870F$.

Normalmente, C1 é aproximadamente o dobro de C2. Sendo assim $C2 = 6956F$ e $C1 = 13913F$.

No que se refere às resistências, considerou-se R1 com um valor igual a 0.45Ω e R2 igual a 2Ω .

5.5 Conclusões

Este capítulo é porventura o mais importante do documento. Foi nele que se mostrou a metodologia que se seguiu para implementar e simular o sistema, bem como os resultados associados aos mesmos e algumas análises. Verificou-se que quer o sistema FV, quer o eólico, quer o sistema global reagem positivamente a alterações impostas às variáveis de entrada dos seus respectivos sistemas, o que é extremamente positivo.

Para além disso, abordou-se o tema das redes neuronais e a importância das previsões para sistemas de produção como aquele que se apresenta neste documento.

Por fim mostrou-se como é que se dimensionou as baterias para o sistema em causa.

Capítulo 6

Análise dos resultados

Este capítulo diz respeito à fase final deste trabalho. É neste capítulo que se discute a qualidade dos resultados obtidos nos modelos simulados, tendo em conta aquilo que era esperado.

Na primeira secção discute-se os resultados das simulações do modelo FV para diferentes condições de funcionamento. Na segunda secção analisa-se o comportamento do sistema eólico quando as suas variáveis de entrada também são sujeitas a alterações. Na terceira e última secção surge a análise dos resultados obtidos para o sistema geral quando explorado segundo as condições ideais de sol e vento e quando sujeito a uma alteração de carga.

As análises efetuadas neste capítulo pretendem explicar o que se verificou no capítulo 5, secção 5.2.

6.1 Resultados do Modelo FV

Olhando para as figuras da secção 5.2.1 verifica-se que o sistema FV responde bem a qualquer variação que lhe possa ser imposta. Isto é, alterando o valor das suas variáveis de entrada seja de que forma for, o sistema tenderá sempre a ir em busca do seu ponto de funcionamento ótimo em termos de potência de saída do sistema.

No que diz respeito às curvas de tensão e de corrente obtidas à saída dos painéis e à entrada da bateria, verifica-se que a tensão aos terminais do painel (V_{pv}) varia da mesma forma que a potência à saída dos mesmos, o que é de esperar uma vez que o controlo do MPPT é realizado tendo como referência essa mesma tensão.

Quanto à tensão na bateria, o valor desta tende para os 90 V, que é o valor pré definido como tensão de referência das baterias. Alterando esse valor, a tensão aos terminais da bateria tenderá para o novo valor.

No que se refere às correntes, o valor da corrente à saída dos painéis FV (I_{cell}) tende para o seu valor nominal (5.52 A) quando as condições de irradiância e de temperatura ambiente são as ideais, isto é, $1000W/m^2$ e $25^{\circ}C$. Quando se impõe uma alteração nessas variáveis, que provoque uma queda de potência, a corrente tende a baixar. Por seu lado, a corrente nas baterias acompanha a evolução da tensão (V_{pv}).

6.2 Resultados do Modelo Eólico

Quanto ao sistema eólico, este demonstra ser sensível às variações dos parâmetros de entrada que lhe possam ser impostos, isto é, a velocidade do vento e o ângulo de inclinação das pás. Assim como no capítulo anterior, a análise é feita tendo em conta a observação das formas de onda do binário motor e da velocidade de rotação do motor, bem como da onda da potência à saída. Assim, analisando a potência à saída do sistema (P_{out}) é possível visualizar o efeito da alteração dos parâmetros de entrada da turbina, sendo que por sua vez ao visualizar a relação do binário e velocidade de rotação com a potência de saída (equação 5.1) verifica-se se a relação entrada/saída do sistema.

Após observar as figuras da secção 5.2.2 é possível conferir que alterando os valores das variáveis de entrada do sistema este dá respostas diferentes em termos dos valores de potência à saída. Por exemplo, passando o valor da velocidade do vento de 10 para 9 m/s verifica-se um decréscimo de potência do sistema, sendo que tal é esperado uma vez que a potência da turbina depende da velocidade do vento (figura 5.7). Em termos de binário e velocidade do motor, a evolução destas é semelhante à da potência uma vez que estas variáveis estão intimamente relacionadas entre si pela equação 5.1.

6.3 Resultados do Modelo Geral

Analisando o modelo do sistema geral e assim como já foi mencionado no capítulo anterior, este apresenta bons resultados ao nível da estabilidade conforme se pode observar pela figura 5.11. A potência assume um comportamento praticamente constante ao longo do tempo, mantendo o valor de potência em torno dos 12 kW, isto para condições ideais de exploração. Esse valor está relacionado com o facto de os painéis produzirem à volta de 2 kW e a turbina eólica debitar aproximadamente 10 kW, conforme se demonstrou nas secções 5.2.2 e 5.2.1.

Quando o sistema é sujeito a uma variação de carga, este continua a comportar-se da mesma forma.

No entanto é importante referir que o sistema global, isto é, o sistema em conjunto, precisa de ser melhorado do ponto de vista da sua sensibilidade às alterações das variáveis de entrada dos sistemas eólicos e FV. Essa será uma etapa a desenvolver futuramente, após a entrega da dissertação uma vez que requer mais tempo de análise.

Capítulo 7

Conclusão

7.1 Conclusões finais sobre a dissertação

Os resultados obtidos nos modelos PSIM desenvolvidos foram satisfatórios, porém há algumas partes que podem ser melhoradas, como o caso dos conversores no sistema eólico e FV e até mesmo o MPPT do sistema FV que pode ver a sua precisão melhorada. O treino de RN para sistemas FV também pode ser um tema a atacar no futuro, por forma a completar aquilo que foi feito no sistema eólico.

Este trabalho demonstrou ser uma componente importantíssima no meu percurso académico, sendo possivelmente a etapa mais valiosa em termos de conhecimento, contribuindo e muito para o meu enriquecimento pessoal. O facto de, no meu entender, ter conseguido bons resultados, faz com que me sinta orgulhoso em relação a mim próprio e à capacidade de atacar os problemas que fui ganhando ao longo da tese. Não foi um trabalho no qual tive 100% de sucesso, havendo vários aspetos a melhorar no próprio projeto, uns já identificados, outros que podem surgir ainda, porém não deixa de ter um balanço positivo.

Pela facto do projeto abordar temas sobre os quais não possuía praticamente conhecimento nenhum, como os conversores ou até os próprios sistemas eólico e fotovoltaico, fez com que me sentisse um pouco à nora nos primeiros tempos, mas ao mesmo tempo sentia-me altamente motivado para desenvolver algo de que me orgulhasse no futuro. Para isso muito contribuiu o Professor Adriano Carvalho, cujo seu conhecimento na área parece ser infindável, e que muito bem me orientou na elaboração dos trabalhos ao longo da dissertação. A sua capacidade de motivar os alunos não está ao alcance de muitos professores.

Ao longo do tempo em que trabalhei na dissertação fui assimilando um conjunto de conhecimentos que me poderão vir a ser altamente úteis no futuro, deixando-me a mente aberta para trabalhar em mais áreas além do setor da Energia. Isto acontece porque durante a pesquisa e realização do trabalho tive que ler sobre assuntos sobre os quais não possuía informação praticamente nenhuma. O facto de ter trabalho com o PSIM, algo que nunca tinha feito antes, pode representar um ganho significativo no futuro, uma vez que fiquei a possuir alguns conhecimentos nesse *software*.

Concluindo, da elaboração da tese tiro essencialmente aspetos positivos, que me fazem olhar para trás e sentir que tudo valeu a pena. Terminar este percurso de 5 anos que incidiram na área de Energia, de que tanto gosto, e complementar esses conhecimentos com a realização desta tese em Energias Renováveis com um pouco de Automação à mistura fazem-me pensar que a tese, além de ter sido um assunto desafiante, foi algo que enriqueceu efetivamente o meu ainda curto currículo.

7.2 Trabalhos futuros

Como já foi referido acima, os resultados deste trabalho não foram 100% satisfatórios. Como tal, surge então uma lista de aspetos a melhorar futuramente, sendo eles:

- Reanálise dos circuitos de controlo por forma a melhorar a sua eficiência;
- Inclusão de um mecanismo que permita controlar o MPPT do sistema eólico, de forma semelhante ao que se fez no sistema FV;
- Efetuar previsões de produção para os sistemas FV;
- Estender as previsões de produção eólica para um intervalo temporal maior;
- Análise económica detalhada do projeto.

Referências

- [1] "deutsches museum". *Web*, June 2014. URL: <http://www.deutsches-museum.de>.
- [2] "upper great plains wind energy peis information center". *Web*, June 2014. URL: <http://plainswindeis.anl.gov>.
- [3] "gwec". *Web*, June 2014. URL: <http://www.gwec.net>.
- [4] Abel António de Azevedo Ferreira. "sistema de produção de energia eólica". 2011.
- [5] "greenstyle | o que está acontecendo no universo eco-friendly". *Web*, June 2014. URL: <http://greenstyle.com.br>.
- [6] "wikipedia". *Web*, June 2014. URL: <http://en.wikipedia.org>.
- [7] "ecosources-portail des énergies renouvelables". *Web*, June 2014. URL: <http://www.ecosources.info>.
- [8] "revista pesquisa fapesp". *Web*, June 2014. URL: <http://revistapesquisa.fapesp.br>.
- [9] "aerogeneradores". *Web*, June 2014. URL: <http://www.merkasol.com>.
- [10] João Nuno Monteiro da Silva Sousa. "previsão da produção eléctrica em parques eólicos". 2013.
- [11] Rui MG Castro. "energias renováveis e produção descentralizada–introdução à energia eólica". *Lisboa, Universidade Técnica de Lisboa, 86p*, 2007.
- [12] "danish wind industry association". *Web*, June 2014. URL: <http://www.windpower.org/>.
- [13] Ricardo Miguel Rodrigues Lima. "estudo e implementação de sistema híbrido de microgeração". 2012.
- [14] "eurostat home". *Web*, June 2014. URL: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home>.
- [15] "portal do eletricista". *Web*, June 2014. URL: <http://www.portaleletricista.com.br/>.
- [16] "blue sol energia solar fotovoltaica". *Web*, June 2014. URL: <http://www.blue-sol.com/>.
- [17] Lucio Almeida Hecktheuer. *Análise de associações de módulos fotovoltaicos*. Journal article, 2013.

- [18] Powersim Inc. Psim® user's guide. páginas 105–107, 2011.
- [19] Mark Hankins. *Stand-alone Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*. Earthscan, 2010.
- [20] Gabriel Tibola. "sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência". 2009.
- [21] M Ragheb. Control of wind turbines. 2009.
- [22] Jose Luis Dominguez Garcia. "modeling and control of squirrel cage induction generator with full power converter applied to windmills". 2011.
- [23] J. C. Ferreira, I. R. Machado, E. H. Watanabe, e L. G. B. Rolim. Wind power system based on squirrel cage induction generator. Em *Power Electronics Conference (COBEP), 2011 Brazilian*, páginas 943–948. doi:10.1109/COBEP.2011.6085309.
- [24] Francisco José Abrunhosa Dias. "soluções técnicas para o projecto de edifícios de habitação incorporando produção própria de energia". *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto-Portugal*, 2009.
- [25] "energias renováveis". *Web*, June 2014. URL: <http://www.brigansol.pt/>.
- [26] "ebah - a rede social para o compartilhamento acadêmico". *Web*, June 2014. URL: <http://www.ebah.com.br/>.
- [27] Efacec. *Web*, June 2014. URL: <http://www.efacec.pt/>.
- [28] J. J. Nedumgatt, K. B. Jayakrishnan, S. Umashankar, D. Vijayakumar, e D. P. Kothari. Perturb and observe mppt algorithm for solar pv systems-modeling and simulation. Em *India Conference (INDICON), 2011 Annual IEEE*, páginas 1–6. doi:10.1109/INDCON.2011.6139513.
- [29] S Mouhadjer, A Chermitti, e A Neçaibia. Comprehensive and field study to design a buck converter for photovoltaic systems. *Revue des Energies Renouvelables*, 15(2):321–330, 2012.
- [30] "bp global". *Web*, June 2014. URL: <http://www.bp.com/>.
- [31] "history of wind energy". *Web*, June 2014. URL: <http://energy.gov/eere/wind/history-wind-energy>.
- [32] "portal das energias renováveis". *Web*, June 2014. URL: <http://www.energiasrenovaveis.com/>.
- [33] William Grylls Adams e RE Day. "the action of light on selenium". *Proceedings of the Royal Society of London*, 25(171-178):113–117, 1876.
- [34] Antônio M Vallêra e Miguel Centeno Brito. "meio século de história fotovoltaica". *Gazeta da física*, 29, 2008.
- [35] J Alves. "requisitos para certificação pv". *Master, Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto*, 2010.

- [36] Filipe Fernandes dos Santos. "utilização de energia fotovoltaica para a eficiência energética de uma moradia". 2010.
- [37] B. C. Babu, S. Sriharsha, A. Kumar, N. Saroagi, e S. R. Samantaray. Design and implementation of low power smart pv energy system for portable applications using synchronous buck converter. Em *Electronic System Design (ISED), 2011 International Symposium on*, páginas 260–266. doi:10.1109/ISED.2011.56.
- [38] "dgeg - direcção-geral de energia e geologia-estatísticas rápidas - nº 109 - março de 2014". 2014.
- [39] "dgeg - direcção-geral de energia e geologia". *Web*, June 2014. URL: <http://www.dgeg.pt/>.
- [40] "microgeração de energia para produzir energia elétrica". *Web*, June 2014. URL: <http://www.microgeracaodeenergia.com/>.
- [41] "portal das energias renováveis". *Web*, June 2014. URL: <http://www.portal-energia.com/>.
- [42] J. G. Sloomweg, S. W. H. De Haan, H. Polinder, e W. L. Kling. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 18(1):144–151, 2003. doi:10.1109/TPWRS.2002.807113.
- [43] Fábio Galízia Ribeiro de Campos. *Geração de energia a partir de fonte eólica com gerador assíncrono conectado a conversor estático duplo*. Thesis, 2004.
- [44] Marcello Monticelli Pereira. Um estudo do aerogerador de velocidade variável e sua aplicação para fornecimento de potência elétrica constante. *Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora*, páginas 46–50, 2004.

Anexo A

Datasheets

Nestes anexos serão ilustrados os dois *datasheets*, o primeiro para os painéis FV e o segundo para a turbina eólica.

A.1 *Datasheet* do painel FV usado

ELECTRICAL CHARACTERISTICS				
Maximum Power(W)	185	190	195	200
Power Tolerance(%)	0~+3	0~+3	0~+3	0~+3
Maximum Power Voltage(V)	35.18	35.65	35.92	36.25
Maximum Power Current(A)	5.26	5.33	5.43	5.52
Open Circuit Voltage(V)	44.08	44.18	44.38	44.61
Short Circuit Current(A)	5.69	5.73	5.8	5.86
Module Efficiency(%)	14.5	14.9	15.3	15.7
Maximum System Voltage(V)	1000	1000	1000	1000
Maximum Reverse Current(A)	15	15	15	15
Temperature Coefficient	Pmax	%/°C	-(0.43±0.05)	
	Isc	%/°C	0.04±0.015	
	Voc	%/°C	-(0.325±0.1)	
Standard Test Condition:				
Irradiance 1000W/m ² , module temperature 25°C, AM15				
MECHANICAL CHARACTERISTICS				
Number of Cells	pcs	72		
Size of Cell	mm	125X125		
Size of Module	mm	1580X808X45		
Weight	kg	15.5		
Connector	MC4 or MC4 compatible			

Figura A.1: Características do painel FV usado

Os dados que serviram de referência para a parametrização dos painéis foram os que se encontram na coluna mais à direita da figura acima, ou seja para uma potência de 200 W por painel.

A.2 Datasheet da turbina usada

PROVEN 15 (15kW wind turbine)																		
PROVEN TM1500 (15m self-supporting tower)																		
<p>Rotor Speed Control</p> <p>Above 12m/s the blades cone to self-adjust the rpm</p>																		
<p>High Build Quality</p> <p>Most components are hot-dip galvanised steel, stainless steel or plastic</p>	<p>Performance</p> <table border="1"> <tr> <td>Out-in wind speed</td> <td>2.5 m/s</td> <td>5.6 mph</td> </tr> <tr> <td>Out-out wind speed</td> <td>54 m/s</td> <td>121 mph</td> </tr> <tr> <td>Rated wind speed</td> <td>12 m/s</td> <td>26 mph</td> </tr> </table>	Out-in wind speed	2.5 m/s	5.6 mph	Out-out wind speed	54 m/s	121 mph	Rated wind speed	12 m/s	26 mph								
	Out-in wind speed	2.5 m/s	5.6 mph															
	Out-out wind speed	54 m/s	121 mph															
	Rated wind speed	12 m/s	26 mph															
	<p>Rotor</p> <table border="1"> <tr> <td>Type</td> <td colspan="2">Downwind, self-regulating</td> </tr> <tr> <td>Number of blades</td> <td colspan="2">3</td> </tr> <tr> <td>Blade material</td> <td colspan="2">Glass thermoplastic composite</td> </tr> <tr> <td>Rotor diameter</td> <td colspan="2">9.6 m</td> </tr> <tr> <td>Rated speed</td> <td colspan="2">150 RPM</td> </tr> <tr> <td>Rotor trust</td> <td colspan="2">26 kN</td> </tr> </table>	Type	Downwind, self-regulating		Number of blades	3		Blade material	Glass thermoplastic composite		Rotor diameter	9.6 m		Rated speed	150 RPM		Rotor trust	26 kN
Type	Downwind, self-regulating																	
Number of blades	3																	
Blade material	Glass thermoplastic composite																	
Rotor diameter	9.6 m																	
Rated speed	150 RPM																	
Rotor trust	26 kN																	
<p>Generator</p> <table border="1"> <tr> <td>Type</td> <td colspan="2">Brushless, direct drive, permanent magnet</td> </tr> <tr> <td>Output</td> <td colspan="2">Grid connect 300V DC, battery charging 48V DC direct heating 240V switch DC</td> </tr> <tr> <td>Annual output</td> <td colspan="2">15,000 – 30,000 kWh</td> </tr> </table>	Type	Brushless, direct drive, permanent magnet		Output	Grid connect 300V DC, battery charging 48V DC direct heating 240V switch DC		Annual output	15,000 – 30,000 kWh										
Type	Brushless, direct drive, permanent magnet																	
Output	Grid connect 300V DC, battery charging 48V DC direct heating 240V switch DC																	
Annual output	15,000 – 30,000 kWh																	
<p>Tower</p> <table border="1"> <tr> <td>Type</td> <td colspan="2">Self-supporting, hinged, tapered</td> </tr> <tr> <td>Hub height</td> <td colspan="2">15 m</td> </tr> <tr> <td>Foundation size</td> <td colspan="2">3.7 x 3.7 x 1.2m concrete</td> </tr> </table>	Type	Self-supporting, hinged, tapered		Hub height	15 m		Foundation size	3.7 x 3.7 x 1.2m concrete										
Type	Self-supporting, hinged, tapered																	
Hub height	15 m																	
Foundation size	3.7 x 3.7 x 1.2m concrete																	
<p>Noise</p> <table border="1"> <tr> <td>48 dB</td> <td colspan="2">All readings taken with an ATP SL-25 portable meter</td> </tr> <tr> <td>65 dB</td> <td colspan="2">At 5 m/s</td> </tr> <tr> <td>70-80 dB</td> <td colspan="2">At 20 m/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="2">Car 15 m away speeding at approx 40 mph</td> </tr> </table>	48 dB	All readings taken with an ATP SL-25 portable meter		65 dB	At 5 m/s		70-80 dB	At 20 m/s			Car 15 m away speeding at approx 40 mph							
48 dB	All readings taken with an ATP SL-25 portable meter																	
65 dB	At 5 m/s																	
70-80 dB	At 20 m/s																	
	Car 15 m away speeding at approx 40 mph																	
<p>Low Speed Equals Durability</p> <p>Low rotor speed (half of the speed of comparable machines) ensures extended durability of blades and bearings.</p> <p>It also means that Proven wind turbines are the quietest in the world!</p>	<p>Weight</p> <table border="1"> <tr> <td>Proven 15</td> <td>1100 kg</td> </tr> <tr> <td>TM 15000</td> <td>1478 kg</td> </tr> </table>	Proven 15	1100 kg	TM 15000	1478 kg													
	Proven 15	1100 kg																
TM 15000	1478 kg																	
<p>Sample of Commercial Customers</p> <p>British Telecom / Scottish Youth Hostel Association / Saudi Aramco Irish Lighthouse Authority / Welsh Water / British Rail Shell Exploration / T-Mobile / Orange</p>																		

Figura A.2: Características da turbina eólica usada

Anexo B

PSIM

B.1 Modelo do painel FV

Nesta secção pretende-se mostrar como é constituído o modelo do painel FV em PSIM, apresentando-se em primeiro lugar o modelo físico do painel, sendo que depois surge o modelo onde se efetua a parametrização do próprio painel.

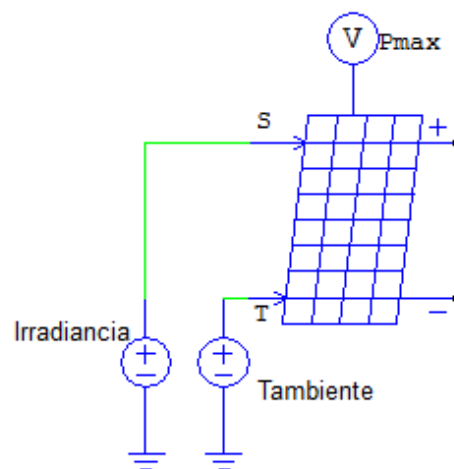


Figura B.1: Modelo do painel FV em PSIM

Na figura acima verifica-se a existência de 3 nós associados aos painéis FV. O nó de entrada "S" refere-se à intensidade luminosa (W/m^2), o nó "T" à temperatura ambiente (em graus) e o nó situado no ponto mais alto do módulo diz respeito à potência máxima que o painel deveria depositar teoricamente.

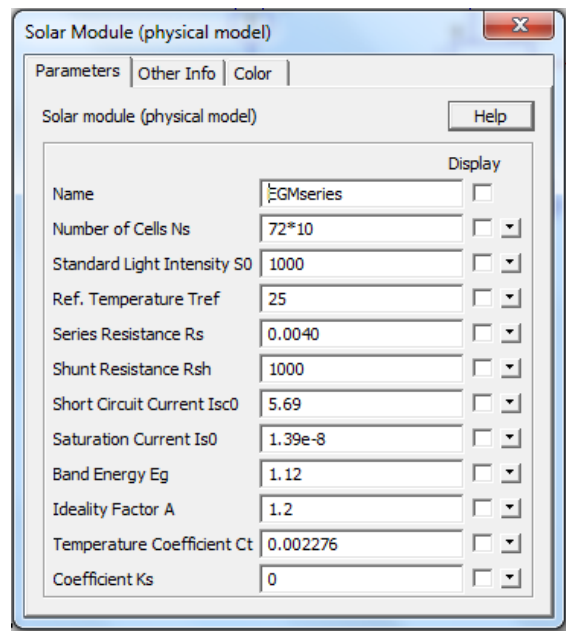


Figura B.2: Parametrização do painel FV

Olhando para a figura acima, visualiza-se o módulo FV em PSIM, onde se efetua a parametrização dos painéis FV de acordo com os *datasheet*.

B.2 Modelo da turbina eólica

Nesta secção pretende-se mostrar como é constituído o modelo da turbina eólica em PSIM, apresentando-se em primeiro lugar o modelo físico da turbina, sendo que depois surge o modelo onde se efetua a parametrização da própria turbina.

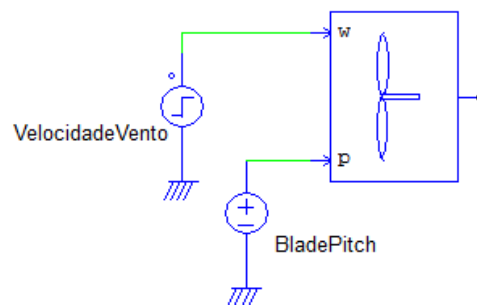


Figura B.3: Modelo da turbina eólica em PSIM

A figura acima diz respeito ao modelo da turbina eólica, onde é possível verificar a existência de 2 nós de entrada. O nó "w" diz respeito à velocidade do vento em m/s e o nó "p" representa o valor de entrada para a *blade pitch* em graus.

Parameter	Value	Display
Name	WT1	<input type="checkbox"/>
Nominal Output Power	15k	<input type="checkbox"/> ▼
Base Wind Speed	12	<input type="checkbox"/> ▼
Base Rotational Speed	50	<input type="checkbox"/> ▼
Initial Rotational Speed	0	<input type="checkbox"/> ▼
Moment of Inertia	1000	<input type="checkbox"/> ▼
Torque Flag	1	▼
Master/Slave Flag	1	▼

Figura B.4: Parametrização da turbina

No módulo acima faz-se a parametrização da turbina eólica em PSIM, de acordo com os dados do *datasheet*.