



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
Instituto Superior de Engenharia

Simulação Generalizada de Sistemas Eólicos e Solares

Aléxio Filipe Braga Chaves

Projeto para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica e Eletrónica
(Especialização em Sistemas de Energia e Controlo)

Setembro de 2018



UNIVERSIDADE DO ALGARVE
Instituto Superior de Engenharia

Simulação Generalizada de Sistemas Eólicos e Solares

Aléxio Filipe Braga Chaves

Projeto para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Elétrica e Eletrónica

(Especialização em Sistemas de Energia e Controlo)

Projeto orientado por: Prof. Doutor Isménio Lourenço Eusébio Martins

Setembro de 2018

SIMULAÇÃO GENERALIZADA DE SISTEMAS EÓLICOS E SOLARES

DECLARAÇÃO DE AUTORIA DO TRABALHO

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências bibliográfica incluída.



© 2018, ALÉXIO FILIPE BRAGA CHAVES

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

Resumo

Nos últimos anos tem-se observado um aumento elevado na procura de energias renováveis por razões ambientais, sociais e económicas.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver ferramentas informáticas que permitam simular o funcionamento dinâmico de sistemas eólicos e solares, permitindo assim a elaboração de previsões do seu funcionamento e da produção de energia.

O projeto baseia-se na criação de duas bibliotecas no Simulink do Matlab com os módulos de simulação que irão caracterizar o funcionamento de aerogeradores de eixo horizontal e vertical, geradores de energia elétrica, painéis fotovoltaicos e controladores de potência máxima (*MPPT – Maximum Power Point Trackers*). Os módulos foram construídos utilizando as S-Functions escritas em Matlab e embebidas nos módulos que serão utilizados em ambiente Simulink para a simulação de aerogeradores e/ou painéis fotovoltaicos.

Palavras-chave: Aerogeradores, Painéis fotovoltaicos, MPPT, Gerador, Modelo dinâmico, Biblioteca Simulink;

Abstract

In recent years there has been a marked increase in the demand for renewable energies for environmental, social and economic reasons.

The main objective of this work is to develop computer tools that allow simulating the dynamic operation of wind and solar systems, allowing the elaboration of predictions of its operation and energy production.

The project is based on the creation of two libraries in Matlab's Simulink with simulation blocks that will describe the operation of horizontal and vertical axis wind turbines, electric generators, photovoltaic panels and maximum power point trackers (MPPT). The modules were constructed using the S-Functions written in Matlab and embedded in the modules that will be used in Simulink environment for the simulation of wind turbines and/or photovoltaic modules.

Key words: Wind turbine, Photovoltaic panels; MPPT, Generator, Dynamic model; Simulink library;

Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem a colaboração de diversas pessoas, pelo que é indispensável um agradecimento a todos os que contribuíram neste projeto direta ou indiretamente.

Agradeço a todo o corpo docente do departamento de Engenharia Eletrotécnica da UALG que estiveram sempre disponíveis para resolver qualquer dúvida, realçando a disponibilidade do Prof. Doutor Isménio Martins que com enorme amabilidade e dedicação contribuiu para a evolução deste projeto.

Agradeço a todos os meus amigos que de uma forma ou de outra ajudaram-me neste projeto motivando-me e cedendo do seu tempo para chegar onde estou hoje.

Por último, mas não menos importante, agradeço do fundo do meu coração aos meus pais que colaboraram desde o início na minha educação e com a qual sem a sua motivação, afeto e amabilidade seria impossível realização deste projeto.

Simbologia

- A – Área da célula / área abrangida pelas pás (m^2);
- G – Radiação incidente (W/m^2);
- G_0 – Radiação solar de referência 1000 (W/m^2);
- G_{STC} – Radiação solar nas condições de referência (W/m^2);
- FF – Fator de preenchimento (*fill factor*);
- I – Corrente à saída do módulo (A);
- I_0 – Corrente reversa de saturação (A);
- I_{ph} – Corrente gerada pela célula fotovoltaica (A);
- I_d – Corrente de fuga no díodo (A);
- I_p – Corrente de fuga pela resistência em paralelo (A);
- $I_{ph,STC}$ – Corrente fotoelétrica gerada nas condições de referência (A);
- $I_{SC,STC}$ – Corrente de curto-circuito nas condições de referência (A);
- I_{SC} – Corrente de curto-circuito (A);
- I_{MPP} – Corrente no ponto de potência máxima (A);
- V – Tensão imposta ao díodo (V);
- V_T – Tensão térmica;
- $V_{OC,STC}$ – Tensão de circuito-aberto nas condições de referência (V);
- V_{OC} – Tensão de circuito aberto (V);
- V_{MPP} – Tensão no ponto de potência máxima (V);
- a – Fator de idealidade do díodo;
- a_1 – Fator de idealidade do díodo 1;
- a_2 – Fator de idealidade do díodo 2;
- k – Constante de Boltzman (J/K);
- q – Carga elétrica (C);
- R_s – Resistência em série (Ω);
- R_p – Resistência em paralelo (Ω);
- N_s – Número de células ligadas em série no módulo;
- N_{ss} – Número de módulos ligados em série;
- N_{pp} – Número de módulos ligados em paralelo;
- k_i – Coeficiente de corrente de curto-circuito em relação à temperatura (A/K)
- k_v – Coeficiente de tensão de circuito-aberto em relação à temperatura (V/K)
- K_v – Constante de fator de MPP de circuito aberto;

- K_I – Constante de fator de MPP de curto-circuito;
 eg – Banda proibida do material (*band gap of material*);
 SF – Fator de sujidade (*soiling factor*);
 a – Coeficiente empírico que determina a temperatura máxima com pouco vento;
 b – Coeficiente empírico que relaciona a descida de temperatura com o vento;
 T_c – Temperatura da célula (K/ °C);
 T_a – Temperatura do ambiente (°C);
 T_{ref} – Temperatura da célula nas condições de referência (K);
 T_m – Temperatura da superfície preta do painel (°C);
 ΔT – Diferença de temperatura entre a célula e a superfície preta do módulo (K);
 V_w – Velocidade média do vento (m/s);
 P_w – Potência captada pelas pás (W);
 T_w – Binário captado pelas pás (Nm);
 ρ – Densidade do ar (kg/m³);
 ρ_0 – Densidade do ar ao nível do mar (kg/m³);
 H_m – Elevação ao nível do mar (m);
 V_u – Velocidade do vento antes de passar pelas pás (m/s);
 V_d – Velocidade do vento depois de passar pelas pás (m/s);
 C_p – Coeficiente de potência;
 C_t – Coeficiente de binário;
 ω_m – Rotação do eixo do rotor das pás (*hub*) (rad/s);
 λ – Razão da velocidade da ponta da pá (*tip speed ratio - TSR*);
 β – Ângulo de *pitch* (°);
 $C1, C2, C3, C4, C5, C6, x$ – Coeficientes aerodinâmicos das pás;
 T_{wtr} – Binário do *hub* com as pás (Nm);
 T_{gen} – Binário no gerador (Nm);
 T_1 – Binário que entra na caixa de velocidades (Nm);
 T_2 – Binário que sai da caixa de velocidades (Nm);
 T_L – Perdas de binário por fricção (Nm);
 J_{wtr} – Momento de inércia do *hub* (kg.m²);
 J_{gen} – Momento de inércia do gerador (kg.m²);
 J_{ech} – Momento de inércia equivalente (kg.m²);
 Ω_{wtr} – Velocidade de rotação do *hub* (rad/s);

- Ω_{gen} – Velocidade de rotação do gerador (rad/s);
- K_{swtr} – Constante de elasticidade do eixo do *hub* (Nm/rad);
- K_{gen} – Constante de elasticidade do eixo do gerador (Nm/rad);
- D_{wtr} – Coeficiente de rigidez do eixo do *hub* (Nm.sec/rad);
- D_{gen} – Coeficiente de rigidez do eixo do gerador (Nm.sec/rad);
- D_{ech} – Coeficiente combinado de fricção equivalente (Nm.sec/rad);
- K_{gear} – Razão de transformação da caixa de velocidades;
- ω_r – Velocidade de rotação do rotor (rad/s);
- ω_s – Velocidade de rotação do eixo de referência (rad/s);
- ω_k – Velocidade de rotação de slip (rad/s);
- s – Desfasamento da rotação de sincronismo (*slip*);
- r_s – Resistência dos enrolamentos do estator (Ω);
- r_r – Resistência dos enrolamentos do rotor (Ω);
- r_f – Resistência do enrolamento do campo de excitação (Ω);
- r_Q – Resistência do enrolamento do *damper Q* (Ω);
- r_D – Resistência do enrolamento do *damper D* (Ω);
- $\lambda_{(dq0)s}$ – Fluxo magnético de fase (*dq0*) no estator (Wb);
- $\lambda_{(dq0)r}$ – Fluxo magnético de fase (*dq0*) no rotor (Wb);
- λ_Q – Fluxo magnético do *damper Q* (Wb);
- λ_D – Fluxo magnético do *damper D* (Wb);
- λ_f – Fluxo do íman permanente (Wb);
- $i_{(abc)s}$ – Corrente de fase (*dq0*) no estator (A);
- $i_{(abc)r}$ – Corrente de fase (*dq0*) no rotor (A);
- i_f – Corrente do campo de excitação (A);
- i_Q – Corrente do *damper Q* (A);
- i_D – Corrente do *damper D* (A);
- $V_{(dq0)s}$ – Tensão da fase correspondente no estator (V);
- V_f – Tensão do campo de excitação (V);
- V_d e V_q – Tensões direta e de quadratura do estator (V);
- L_{ls} – Indutância de fuga do estator (H);
- L_m – Indutância de magnetização do estator (H);
- L_{lr} – Indutância de fuga do rotor (H);
- L_s – Indutância própria do estator (H);

- L_r – Indutância própria do rotor (H);
- L_{lQ} – Indutância de fuga do *damper* Q (H);
- L_{lD} – Indutância de fuga do *damper* D (H);
- L_{lf} – Indutância de fuga do campo de excitação (H);
- L_{md} – Indutância mútua nos eixos d (H);
- L_{mq} – Indutância mútua nos eixos q (H);
- L_d e L_q – Indutâncias próprias direta e de quadratura do estator (H);
- M – Indução mútua entre o eixo d e q do estator (H);
- T_e – Binário eletromecânico (Nm);
- p – Número de pares de pólos;

Índice Geral

Resumo	I
Abstract.....	II
Agradecimentos	III
Simbologia.....	IV
1. INTRODUÇÃO E ESTADO DA ARTE	1
1.1 Energias Renováveis.....	1
1.1.1Energias Renováveis em Portugal	4
1.2 Energia eólica	5
1.2.1 Recurso eólico	6
1.2.2 Recurso eólico nacional.....	8
1.3 O Aerogerador	10
1.3.1 Aerogeradores de eixo vertical	11
1.3.2 Aerogeradores de eixo horizontal.....	11
1.4 Energia solar	19
1.4.1 Radiação solar.....	19
1.5 Painéis Fotovoltaicos	22
1.5.1 Tipos de células Fotovoltaicas.....	24
Primeira Geração	24
Segunda Geração	24
Terceira Geração.....	25
1.5.2 Painéis Fotovoltaicos, constituição.....	25
1.5.3 Curva característica I-V	26
1.5.4 Ligação à rede elétrica.....	29
2. MODELAÇÃO DE SISTEMAS EÓLICOS E SOLARES.....	30
2.1 Modelação de Aerogeradores	30
2.1.1 Modelação aerodinâmica.....	30

Aerogeradores de eixo vertical	33
Aerogeradores de eixo horizontal.....	34
Relação entre C_t e C_p	34
Determinação do C_p	34
2.1.2 Modelação das transformações mecânicas	35
2.1.2.1 Modelo de três massas	36
2.1.2.2 Modelo de duas massas	37
2.1.2.3 Modelo de uma massa com perdas dinâmicas de fricção	39
2.1.2.5 Modelo de uma massa com perdas por fricção constantes	39
2.1.2.4 Modelo de uma massa sem perdas	39
2.1.3 Modelação de geradores	40
2.1.3.1 Gerador assíncrono	41
Gerador assíncrono, modelo $dq0$	41
Gerador assíncrono, modelo em estado estacionário.....	44
Modelo do gerador indutivo de gaiola de esquilo em estado estacionário.....	45
2.1.3.2 Gerador Síncrono.....	46
Gerador síncrono, modelo $dq0$	46
2.1.3.3 Gerador Síncrono de magnetos permanentes	48
Gerador síncrono de magnetos permanentes com indutâncias próprias diferentes	48
Gerador síncrono de magnetos permanentes com indutâncias próprias iguais	50
2.2 Modelação de painéis fotovoltaicos	51
2.2.1 Modelo um-díodo	51
Modelo ideal de um-díodo.....	51
Modelo de um-díodo com resistência em série	53
Modelo de um-díodo com resistência em serie e em paralelo.....	53
Comparação dos três modelos	54
Modelo de um-díodo para um painel com matriz $N_{ss} \times N_{pp}$	54

2.2.2 Modelo de dois-díodos	55
Modelo de dois-díodos com resistência em serie e em paralelo.....	55
Modelo de dois-díodos para um painel com matriz $N_{ss} \times N_{pp}$	56
2.2.3 Cálculo de parâmetros	56
Cálculo do parâmetro I_{ph}	56
Cálculo do parâmetro I_0	56
Fator de sujidade.....	57
2.2.4 Modelos de temperatura	58
Modelo termodinâmico com coeficientes obtidos com regressão linear.....	58
2.2.5 MPPT – Solar	61
2.2.5.1 $MPPT - \partial P / \partial V$	61
2.2.5.2 $MPPT - FOV \& FSC$	62
Método FOV	62
Método FSC	63
Algoritmos $FOV \& FSC$	63
2.2.5.3 $MPPT - P\&O$	64
3.MODELOS SIMULINK	66
3.1 Biblioteca de energia solar	66
3.2 Biblioteca de energia eólica.....	69
4.SIMULAÇÃO E RESULTADOS	74
4.1 Biblioteca da energia solar	74
Simulação dos painéis fotovoltaicos	74
Simulação dos controladores $MPPT$ para painéis fotovoltaicos	78
4.2 Biblioteca da energia eólica.....	80
Simulação da determinação do C_p	80
Simulação das transformações mecânicas.....	81
Simulação dos geradores	83

Simulação do aerogerador	88
5.CONCLUSÕES	92
6. BIBLIOGRAFIA	93
ANEXOS	96
Parâmetros utilizados, na validação dos modelos dos módulos fotovoltaicos.	96
Parâmetros utilizados na simulação do aerogerador.....	97
Transformação de <i>Park</i>	98

Índice de Figuras

Figura 1 - Participação estimada de energia renováveis na produção mundial de eletricidade [2].....	2
Figura 2 - Indicadores de Energias Renováveis 2017 [2].....	2
Figura 3 - Participação de fontes de energia renováveis variáveis em 2017, top 10 países [2].	3
Figura 4 - Evolução da potência instalada para produção de eletricidade das diferentes fontes em Portugal [3].	4
Figura 5 - Peso das diferentes fontes na produção de eletricidade em Portugal em 2017 [3].	5
Figura 6 - Sequencia de conversões de energia do aerogerador.....	6
Figura 7 – Evolução da potência total instalada de Energia Eólica [4].....	6
Figura 8 - Atlas Europeu do Vento [5].	7
Figura 9 - Top 10 países com maior capacidade de energia eólica instalada [4].	8
Figura 10 - Atlas Português dos Ventos (80m) [6].....	9
Figura 11 - Capacidade Eólica instalada na Europa, em 2017 [4].	9
Figura 12 - Princípio de funcionamento de um aerogerador [8].	10
Figura 13- Aerogerador de eixo vertical [9].....	11
Figura 14 - Representação dos componentes básicos de um aerogerador de eixo horizontal [10].	12
Figura 15 - Potência do aerogerador Vs diâmetro das pás [11].....	13
Figura 16 - Curva exponencial do aumento de potência com o aumento do diâmetro do raio das pás [12].....	14
Figura 17 - Coeficiente de potência para diferentes números de pás [13].	14
Figura 18 - Curva de potência do aerogerador E-44 [14].....	15
Figura 19 - Sistema de conversão de velocidade constante [15].....	16
Figura 20 - Sistema de conversão de velocidade variável limitada [15].....	17
Figura 21 - Sistema de conversão de velocidade variável com conversão parcial [15].	18
Figura 22 - Sistema de conversão de velocidade variável com conversão integral [15].	18
Figura 23 - Orbita Terrestre e a variação da declinação solar anual [17].....	20
Figura 24 - Inclinação do coletor.....	21
Figura 25 - Radiação na superfície em alguns climas típicos [19].....	21
Figura 26 - Espetro da irradiação na atmosfera e na superfície da terra [16].....	22

Figura 27 - Diagrama do efeito fotovoltaico [22].	23
Figura 28 - Constituição de um painel fotovoltaico [23].	26
Figura 29 - Curva de característica I-V de uma célula fotovoltaica [24].	26
Figura 30 - Curva I-V com variação de radiação Vs com variação de temperatura da célula [24].	28
Figura 31 - Curva I-V, células conectadas em paralelo Vs células conectada em serie [24].	29
Figura 32- Curvas típicas de Cp em função da TSR [26].	33
Figura 33 - Esquema do modelo de três massas [29].	36
Figura 34 - Esquema do modelo de duas massas [29].	37
Figura 35 – Esquema coordenadas dq0 do gerador assíncrono [29].	42
Figura 36 - Circuito equivalente do DFIG em steady state [32].	45
Figura 37 – Esquema representativo do modelo ideal de um -díodo [38].	51
Figura 38 - Esquema representativo do modelo de um-díodo com resistência em série [38].	53
Figura 39 - Esquema representativo do modelo de um-díodo com resistência em série e em paralelo [38].	53
Figura 40 - Esquema representativo do módulo de dois-díodos com resistência em série e em paralelo [40].	55
Figura 41 - Exemplo de medições obtidas para determinar os coeficientes a e b [41].	59
Figura 42 - Algoritmo do MPPT de $\partial P / \partial V$.	62
Figura 43 - Algoritmo do MPPT de FSC & FOC.	64
Figura 44 - Algoritmo MPPT de P&O.	65
Figura 45 - Aspeto da biblioteca com os modelos solares.	66
Figura 46 - Parâmetros introduzidos nos blocos dos módulos solares.	68
Figura 47- Parâmetros introduzidos nos blocos MPPT.	68
Figura 48 - Aspeto da biblioteca com os modelos eólicos.	69
Figura 49 - Parâmetros do bloco One-mass_dynamic_friction.	71
Figura 50 - Parâmetros a introduzir no bloco PMSG_s-function.	72
Figura 51 - Parâmetros do bloco SG_s-function.	73
Figura 52 - Curva de I-V dos diferentes módulos, nas condições STC (1000W/m ² , 25°C).	74
Figura 53 - Curva I-V validada em [40].	75

Figura 54 – Curva P-V dos diferentes módulos, nas condições STC (1000W/m ² , 25°C).	75
Figura 55 -Curva I-V com matriz de módulos NssXNpp (20x10).	76
Figura 56 - Curva P-V com matriz de módulos NssXNpp (20x10).	76
Figura 57 - Curva I-V com variação da radiação.	77
Figura 58 - Curva P-V com variação da radiação.	77
Figura 59 - Curva I-V com variação da temperatura.	78
Figura 60 - Curva P-V com variação da temperatura.	78
Figura 61 - Ambiente Simulink para validar os modelos de MPPT.	79
Figura 62 - Potência de saída com controlos de potência máxima.	79
Figura 63 - Diferença da potência de saída com o controlador de potência máxima.	80
Figura 64 - Curva Cp para diferentes ângulos de pitch.	81
Figura 65 - Ambiente Simulink utilizado na validação dos blocos de transformações mecânicas.	82
Figura 66 - Binário obtido na validação dos blocos One-mass.	82
Figura 67 - Velocidade de rotação obtidas na validação dos blocos One-mass.	83
Figura 68 – Ambiente Simulink utilizado na validação dos geradores síncronos de magnetos permanentes.	84
Figura 69 – Simulação dos geradores síncronos de magnetos permanentes, velocidade de rotação.	84
Figura 70 – Simulação dos geradores síncronos de magnetos permanentes, binário eletromecânico e corrente na fase L1.	85
Figura 71 – Ambiente Simulink utilizado na validação do gerador síncrono.	86
Figura 72 - Simulação do gerador síncrono, binário eletromecânico e velocidade de rotação do rotor.	86
Figura 73 - Simulação do gerador síncrono, corrente de excitação e corrente da fase L1.	87
Figura 74 – Ambiente Simulink utilizado na validação dos geradores indutivos com gaiola de esquilo.	87
Figura 75 - Simulação dos geradores indutivos com gaiola de esquilo, binário eletromecânico e corrente da fase L1.	88
Figura 76 - Ambiente Simulink utilizado para simular o aerogerador.	89
Figura 77 - Simulação do aerogerador, Binário eletromagnético vs Binário das pás. ...	89
Figura 78 - Simulação do aerogerador, rotação das pás.	90

Figura 79 - Simulação do aerogerador, corrente de saída do gerador.	90
Figura 80 - Simulação do aerogerador, TSR e C_p	91

1. INTRODUÇÃO E ESTADO DA ARTE

1.1 Energias Renováveis

O desenvolvimento da humanidade esteve sempre associado à utilização de fontes de energia, já os nossos antepassados utilizavam recursos como a energia cinética da água e o vento para produzir forças motrizes e a lenha para produzir calor. Com os acontecimentos das grandes revoluções industriais, surgiram outras formas de energia, os denominados combustíveis fósseis (carvão e derivados do petróleo) das quais a humanidade ficou largamente dependente, mantendo-se esta dependência até os dias atuais. No entanto, nos últimos anos o sector energético tem sofrido uma metamorfose. Isto deve-se ao crescente aumento do consumo energético, à escassez associada aos combustíveis fósseis, à volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis e à poluição associada ao uso destes. Como seria de esperar a produção de energia elétrica está a migrar lentamente para as fontes de energia renovável, que são fontes de energia onde a velocidade de reposição da fonte primária é superior à velocidade de consumo. Excetuando-se a energia geotérmica e a energia das marés, todas as outras formas de energias renováveis dependem direta ou indiretamente da energia solar que o planeta recebe diariamente. Das várias fontes de energia renovável existentes, será dado um foco neste trabalho à energia solar e à energia eólica [1].

Como foi mencionado anteriormente, as energias renováveis tem como fonte primária de energia recursos que se “restauram” a uma velocidade superior à do seu consumo, estas também são consideradas “amigas do ambiente” ou energias limpas por reduzirem a emissão de CO₂, o grande responsável pelo aparecimento da camada de efeito estufa.

Existe uma grande variedade de energias renováveis, tais como:

- Energia hidroelétrica – aproveita a energia dos cursos de água como rios ou ribeiras para a produção e eletricidade;
- Energia geotérmica – aproveita-se o calor proveniente do interior da terra para a produção de calor e/ou eletricidade;

- Energia solar – aproveita a energia das radiações solares para a produção de eletricidade ou calor (como o aquecimento de águas sanitárias), quanto à produção de eletricidade, pode-se ter conversão direta por painéis fotovoltaicos ou por energia solar concentrada.
- Energia eólica – aproveita a energia cinética do vento para a produção de eletricidade;
- Energia dos oceanos – aproveita a energia das ondas e/ou das marés para a produção de eletricidade;
- Energia da biomassa – aproveitam-se resíduos orgânicos para a produção de calor e/ou eletricidade;
- Biocombustíveis – uma forma de combustível produzido por matéria biológica e não fóssil como no caso dos combustíveis convencionais, existe para preencher a lacuna de recursos renováveis no que toca aos transportes;

Para melhor compreender a importância de cada uma destas fontes de energia renovável, retirou-se o gráfico, mostrado na Figura 1, da “Participação estimada de energias renováveis na produção mundial de eletricidade, final de 2017” do relatório “Renewables 2018 – Global Status Report” publicado pela REN21 [2] e a tabela de “Indicadores de Energias Renováveis”, mostrada na Figura 2.

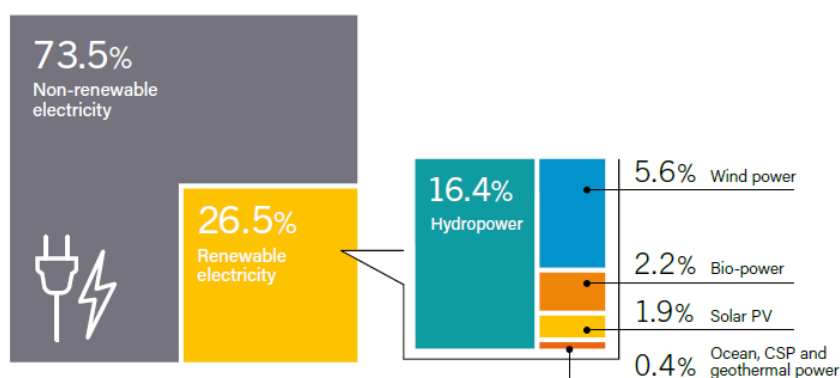


Figura 1 - Participação estimada de energia renováveis na produção mundial de eletricidade [2].

		2016	2017
POWER			
Renewable power capacity (including hydro)	GW	2,017	2,195
Renewable power capacity (not including hydro)	GW	922	1,081
Hydropower capacity ²	GW	1,095	1,114
Bio-power capacity	GW	114	122
Bio-power generation (annual)	TWh	501	555
Geothermal power capacity	GW	12.1	12.8
Solar PV capacity ³	GW	303	402
Concentrating solar thermal power (CSP) capacity	GW	4.8	4.9
Wind power capacity	GW	487	539
Ocean energy capacity	GW	0.5	0.5

Figura 2 - Indicadores de Energias Renováveis 2017 [2].

Como se pode observar na Figura 1, na produção da eletricidade as energias renováveis tem uma participação de **26,5 %** onde, destes **16,4 %** correspondem à energia hídrica. A energia eólica tem uma participação de **5,6 %**, sendo a segunda fonte de energia renovável de maior importância, e a energia solar fotovoltaica tem uma participação de **1,9 %**. Neste gráfico foi considerada só a geração de eletricidade, não estão a ser considerados aqui o setor dos transportes nem a produção de calor para aquecimento por exemplo.

Quanto à potência instalada, pode observar-se na Figura 2 que a energia solar e a energia eólica evoluíram positivamente na capacidade instalada nos últimos anos.

Algumas fontes de energia renovável, como a energia eólica e a energia solar, não apresentam uma produção constante e totalmente previsível, devido à larga dependência das condições atmosféricas. Em resultado desta característica podemos chamar estas fontes de energia como Energias Renováveis Variáveis. Na Figura 3 é exibido o peso da participação da energia eólica e solar nos 10 países com maior participação de energias renováveis variáveis em 2017.

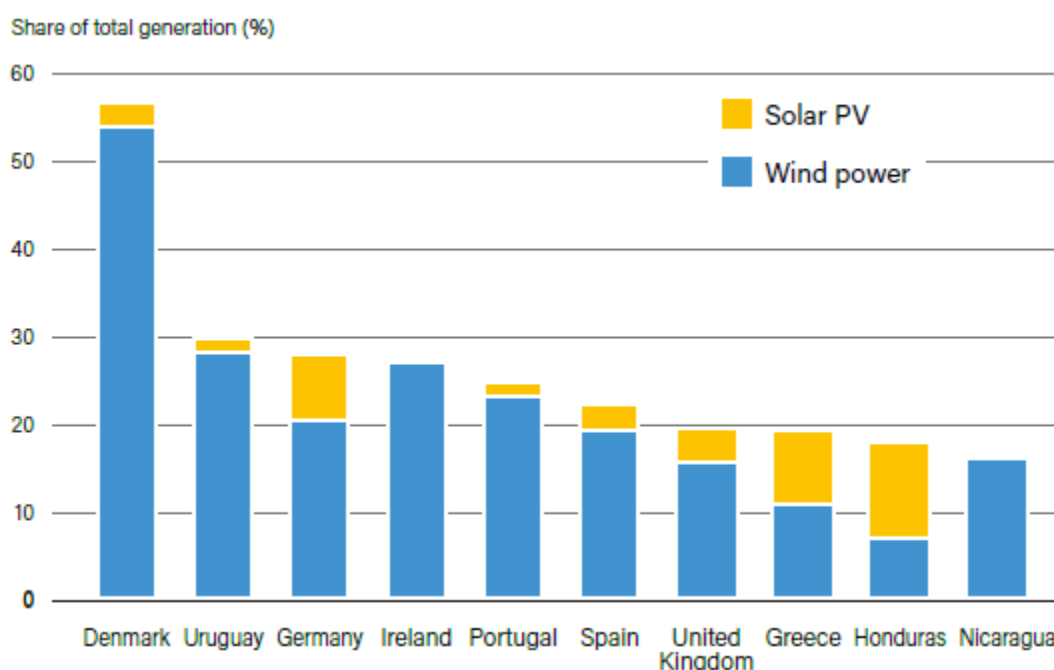


Figura 3 - Participação de fontes de energia renováveis variáveis em 2017, top 10 países [2].

Como se pode observar, a Dinamarca, em 2017, produziu cerca de **55 %** da sua eletricidade utilizando a energia solar e a energia eólica, seguindo-se o Uruguai, Alemanha, Irlanda, Portugal e Espanha com produções acima dos **20 %**. Também se

observa que excetuando a Grécia, Honduras e a Alemanha, todos os outros países tem participações de energia solar reduzida quando comparada com a participação eólica.

1.1.1 Energias Renováveis em Portugal

Como se sabe em Portugal não existem reservas de combustíveis fósseis, sendo que o interesse pelas fontes renováveis já se verifica há alguns anos, principalmente na energia hidroelétrica, da qual Portugal tem enormes recursos podendo assim contribuir para uma grande parte da energia elétrica gerada no país. Na Figura 4 está ilustrada a evolução dos centros electroprodutores instalados em Portugal, com a contribuição das diferentes fontes de energia primária.

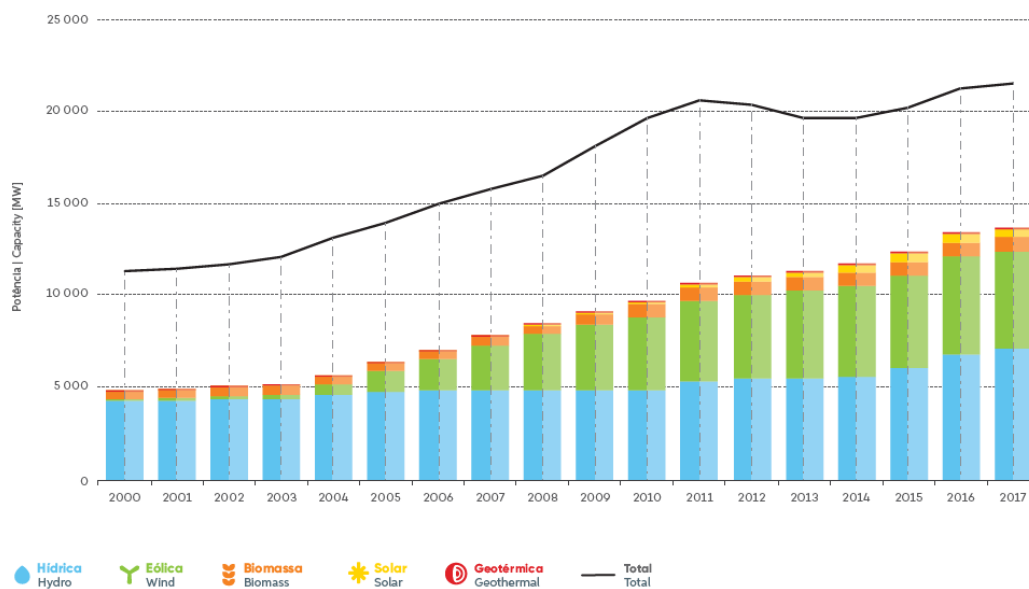


Figura 4 - Evolução da potência instalada para produção de eletricidade das diferentes fontes em Portugal [3].

Como se pode observar na Figura 4, a energia hídrica tem um enorme historial na produção de eletricidade em Portugal. No entanto a grande “novidade” que se verificou nos últimos anos foi o crescimento rápido da capacidade de eólica instalada. Isto deve-se sobretudo, ao desenvolvimento tecnológico do aerogerador que permitiu uma redução dos preços do mesmo, tornando-o mais competitivo.

No que toca à produção de energia elétrica em 2017, pode-se observar na Figura 5 a distribuição das diferentes fontes de energia, utilizadas para a produção de eletricidade, em Portugal.

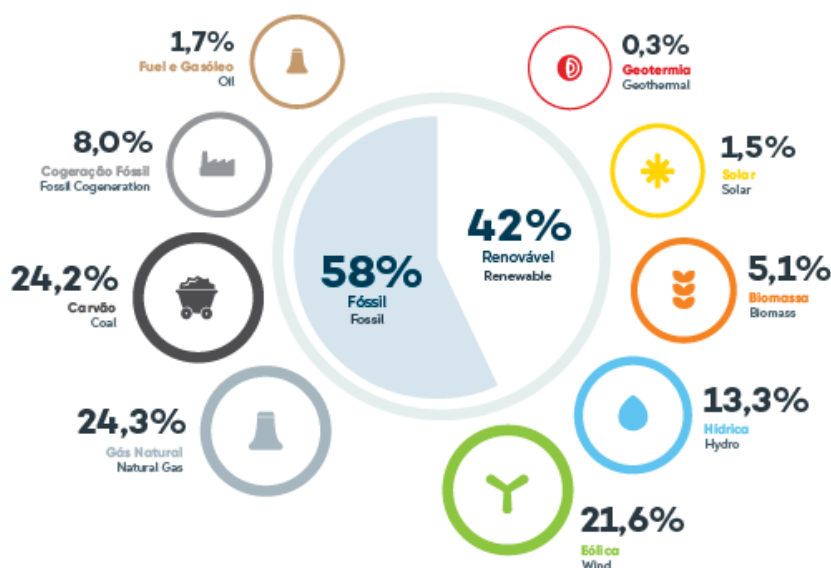


Figura 5 - Peso das diferentes fontes na produção de eletricidade em Portugal em 2017 [3].

No ano de 2017 a maior contribuidora, nas energias renováveis foi a energia eólica com **21,6 %** da eletricidade total produzida em Portugal, seguindo-se a energia hídrica com **13,3 %** da produção. Não esquecendo da energia solar que contribui com **1,5 %** da eletricidade total produzida em Portugal. No global **42 %** da energia produzida em Portugal no ano 2017 foi proveniente de origem renovável.

1.2 Energia eólica

O vento é um enorme recurso renovável que tem vindo a ganhar uma grande importância nos últimos anos, este é originado pelo aquecimento irregular das diferentes massas de ar, proveniente da radiação solar, formando-se assim diferentes pressões e provocando a deslocação de massas de ar [1].

Desde os primórdios da humanidade que a energia do vento tem sido aproveitada, umas das primeiras utilizações deste recurso foi a conversão para energia mecânica com o propósito de se moverem barcos e moinhos para moer cereais. Recentemente a energia eólica tem estado em grande destaque, devido aos aerogeradores que têm a funcionalidade de transformar a energia cinética do vento em energia elétrica. Nesta transformação não são gerados gases de efeito estufa, sendo assim uma fonte de energia limpa. Atualmente

existe uma diversa gama de aerogeradores que podem ir de uns meros kW's até alguns MW's de potência. Mais tarde, os aerogeradores serão abordados em pormenor.

Na Figura 6 esquematiza-se a sequência das conversões de energia, desde a energia cinética do vento até à energia elétrica.

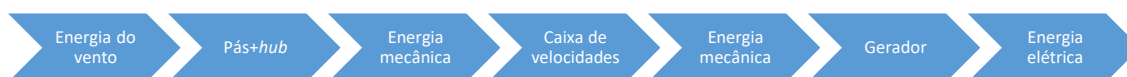


Figura 6 - Sequencia de conversões de energia do aerogerador

De modo a otimizar a energia produzida pelos aerogeradores, são construídos parques eólicos (contendo vários aerogeradores) em zonas com bons perfis de ventos. Para evidenciar o recente destaque dado à energia eólica é ilustrado na Figura 7, o gráfico da evolução da potência total eólica instalada desde 2001 até 2017. Facilmente se observa que o crescimento da capacidade eólica instalada teve uma evolução constante, o que reafirma o elevado interesse que a energia eólica obteve por parte dos investidores nos últimos anos.

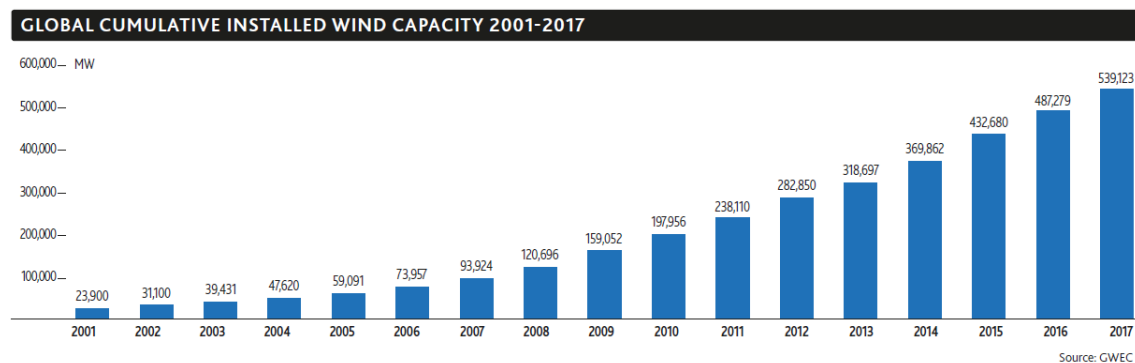


Figura 7 – Evolução da potência total instalada de Energia Eólica [4].

1.2.1 Recurso eólico

Como foi dito anteriormente, a energia eólica consiste no aproveitamento do vento para a produção de outras formas de energia. A partir de agora, passa-se a referir a energia eólica unicamente na sua vertente de produção de energia elétrica, sendo as outras formas de energia resultantes do aproveitamento do vento não abrangidas por este documento.

O recurso eólico não é igualmente distribuído pelo mundo. Existem zonas mais propícias para o aproveitamento deste recurso, existindo outras zonas onde não é possível aproveitar este recurso de uma forma economicamente viável. Assim, a construção de parques eólicos requer a elaboração projetos detalhados sobre o potencial eólico que só pode ser determinado detalhadamente se existir um histórico de ventos do local alvo de estudo.

Devido ao crescente interesse no recurso eólico, foi publicado o “Atlas Europeu do Vento”, ilustrado na Figura 8, que veio colmatar a lacuna de informação referente aos dados de ventos que, muitas vezes, são difíceis de se obter para o local de estudo. Deve-se notar, no entanto, que este é um modelo “bruto” onde não foram considerados os efeitos locais da topografia [5].

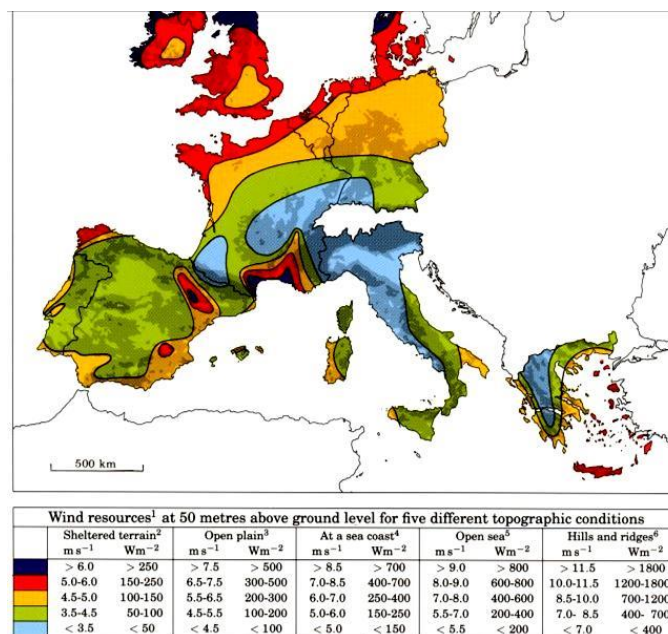


Figura 8 - Atlas Europeu do Vento [5].

Como é ilustrado no atlas do vento, a distribuição do recurso eólico não é uniforme, sendo que existem zonas onde o potencial eólico é elevado, como no Reino Unido, e zonas onde o potencial é muito reduzido como no norte de Itália.

Recentemente, tem vindo a crescer o interesse pela instalação de parques eólicos no mar, os denominados parques eólicos Offshore. Isto deve-se a uma diversidade de fatores como o desenvolvimento tecnológico das fundações no mar e o elevado potencial eólico existente no oceano. Da mesma forma que foi publicado o Atlas Europeu do Vento, também foi publicado o Atlas Europeu do Vento Offshore.

Segundo o “Global Wind Report” a potência total instalada no mundo em 2017 era de **5399.123 MW** onde **35 %** estão instalados na China [4]. Na Figura 9 estão representados os 10 países com maior capacidade total instalada de energia eólica no final de 2017.

TOP 10 CUMULATIVE CAPACITY DEC 2017		
Country	MW	% Share
PR China	188,392	35
USA	89,077	17
Germany	56,132	10
India	32,848	6
Spain	23,170	4
United Kingdom	18,872	4
France	13,759	3
Brazil	12,763	2
Canada	12,239	2
Italy	9,479	2
Rest of the world	82,391	15
Total TO P10	456,732	85
World Total	539,123	100

Figura 9 - Top 10 países com maior capacidade de energia eólica instalada [4].

Como se pode observar, a China domina na capacidade de eólica instalada com uns **188.392 MW** instalados o que corresponde **35 %** da potência instalada mundial. Nesta corrida pela energia eólica, segue-se os Estado Unidos da América com **17 %**, e a Alemanha com **10 %** da capacidade mundial instalada.

1.2.2 Recurso eólico nacional

À semelhança do panorama mundial, em Portugal a energia eólica tem vindo a ganhar um enorme destaque nos últimos tempos. Isto deve-se, sobretudo, à crescente preocupação ambiental e à volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis, dos quais Portugal não tem reservas sendo necessário importar. No entanto, é sabido que em Portugal existem grandes potencialidades no que toca a recursos renováveis, como a energia hídrica, já explorada há décadas em Portugal com a finalidade da produção de eletricidade. O LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia) tem também realizado estudos sobre o potencial eólico Português, do qual resultou várias publicações como o “Atlas Português dos Ventos” onde, de modo semelhantemente ao Atlas Europeu do Ventos, extrapola a potencialidade do recurso eólico ao longo do país. Na Figura 10 é exibido o atlas Português dos ventos.

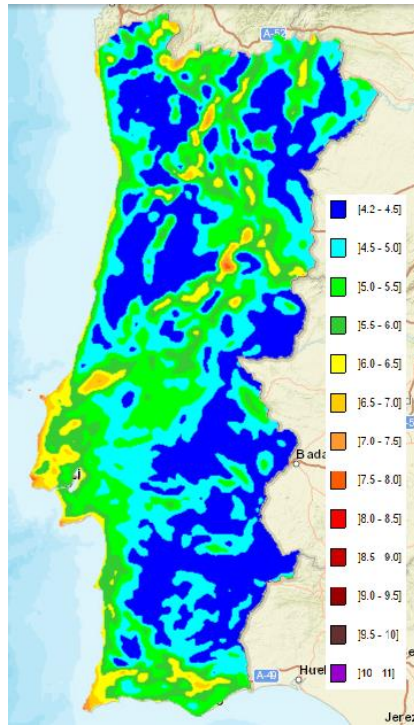


Figura 10 - Atlas Português dos Ventos (80m) [6].

Como se pode observar no atlas do vento, o maior potencial eólico existe no litoral Centro e Sul de Portugal e no interior do Norte de Portugal.

De forma a situar a capacidade eólica instalada em Portugal em relação ao resto da Europa, é ilustrado na Figura 11 a capacidade total instalada dos vários países Europeus no último ano (retirado do Global Wind Report [4]).

GLOBAL INSTALLED WIND POWER CAPACITY (MW) – REGIONAL DISTRIBUTION		Total 2017
EUROPE		
	Germany	56,132
	Spain	23,170
	UK	18,872
	France	13,759
	Italy	9,479
	Turkey	6,857
	Sweden	6,691
	Poland	5,848
	Denmark	5,476
	Portugal	5,316
	Netherlands	4,341
	Ireland	3,127
	Romania	3,029
	Belgium	2,843
	Austria	2,828
	Finland	2,071
	Rest of EU	5,745
	EU-28 ⁴	168,729
	Rest of Europe ³	8,777
	Total Europe	177,506

Figura 11 - Capacidade Eólica instalada na Europa, em 2017 [4].

Como se pode observar no final 2017 Portugal tinha instalado, em energia eólica, uma potência de **5,3 GW** o que corresponde, aproximadamente a **3 %** da capacidade instalada na Europa.

No que toca à energia eólica offshore em Portugal, só muito recentemente tem ganhado interesse, sendo que em 2011 foi instalado um protótipo, o WindFloat, de **2 MW** a **5 km** da costa de Aguçadoura, tendo-se, em 2016, concluído com sucesso as fases de teste deste projeto [7].

1.3 O Aerogerador

O aerogerador é uma máquina que tem como propósito a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica que pode ser armazenada ou injetada diretamente na rede elétrica. Atualmente, no mercado, existe uma enorme variedade de aerogeradores, que vão responder às diferentes limitações/características dos locais para a sua instalação, às diferentes gamas de potências disponíveis, etc. Na Figura 12 é ilustrado o princípio de funcionamento de um aerogerador.

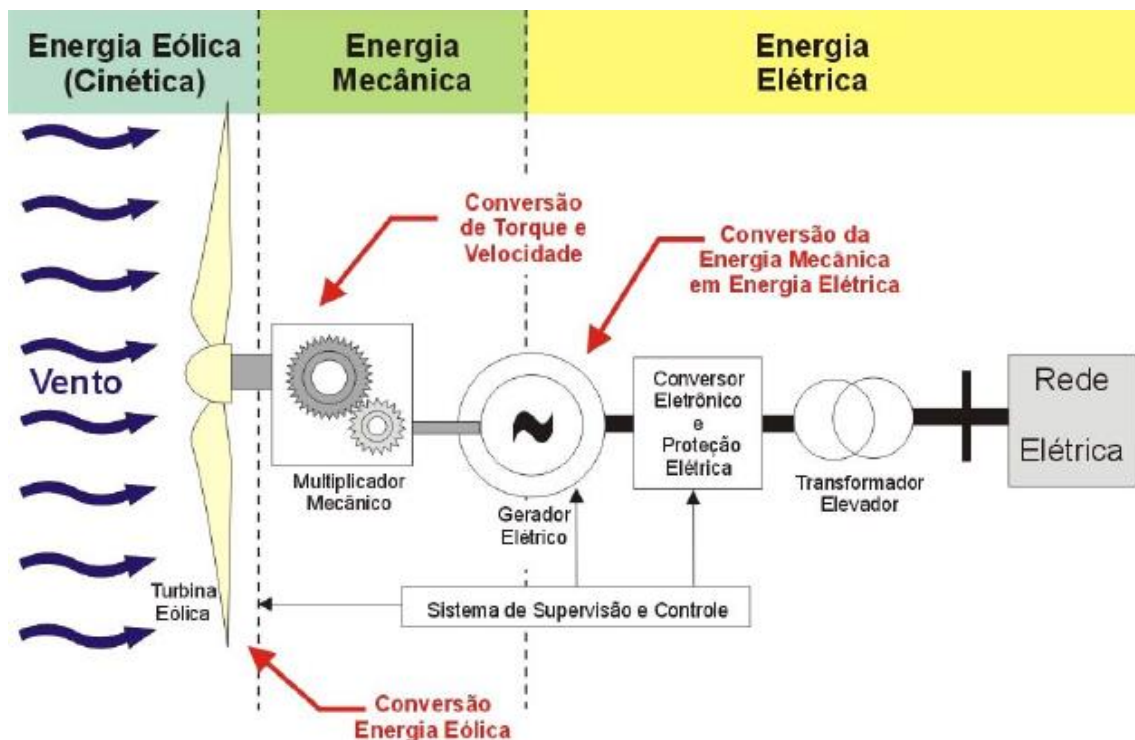


Figura 12 - Princípio de funcionamento de um aerogerador [8].

Como se pode observar, o vento ao embater nas pás transfere a energia cinética do vento para as pás, transformando-a em energia mecânica de rotação do rotor. Esta energia mecânica é convertida em eletricidade utilizando o gerador. Ver-se-á mais tarde que este princípio de funcionamento pode sofrer alterações, consoante o tipo de aerogerador em estudo.

1.3.1 Aerogeradores de eixo vertical

Os aerogeradores de eixo vertical são ideais para a utilização em meios urbanos, pois são silenciosos, trabalham bem em condições de turbulência e aproveitam o vento de todas as direções, não havendo necessidade de instalar equipamentos para acompanhar a direção do vento. No entanto, estes aerogeradores apresentam um rendimento de conversão da energia eólica inferior ao dos aerogeradores de eixo horizontal. Este tipo de aerogerador representa uma minoria no mercado dos aerogeradores [1].

Na Figura 13 é ilustrado um exemplo de um aerogerador de eixo vertical.



Figura 13- Aerogerador de eixo vertical [9].

1.3.2 Aerogeradores de eixo horizontal

Os aerogeradores de eixo horizontal são os que mais abundam no mercado, isto deve-se, principalmente, a terem um maior rendimento energético do que os de eixo vertical. O

aerogerador de eixo horizontal pode ser dividido em três grandes componentes, o rotor, a cabine e a torre [10].

- A Torre – é o principal componente que suporta a cabine e o rotor, esta pode ter mais de cem metros de altura e é normalmente fabricada de aço ou betão. O propósito da torre ser alta surge na necessidade de se aproveitar os ventos menos turbulentos e de maior velocidade, aumentando assim o rendimento de conversão.
- A Cabine ou Nacelle – é onde estão alojados os principais componentes para a produção de energia e segurança do aerogerador, tais como o gerador, travão, caixa de velocidades (quando existe), mecanismos de orientação (sistema de *Yaw*), anemómetros, entre outros.
- O Rotor – este é o elemento de fixação das pás que transmite a rotação para a caixa de velocidades ou no caso de esta não existir para o rotor do gerador. As pás no rotor podem ter um sistema de controlo do ângulo tipo *Pitch* onde variam o ângulo de ataque da pá para melhor aproveitar a energia do vento.

Na Figura 14 mostra-se o esquema básico dos componentes de um aerogerador de eixo horizontal, onde:

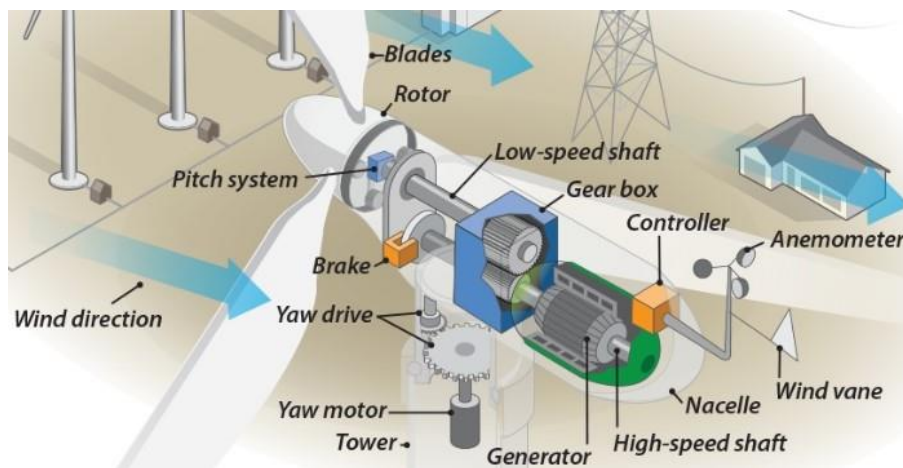


Figura 14 - Representação dos componentes básicos de um aerogerador de eixo horizontal [10].

- As pás (*blades*) são o elemento responsável pela conversão da energia do vento em energia mecânica (rotação);
- O rotor (*hub*) é o elemento de fixação das pás;
- O sistema de controlo do ângulo das pás (*pitch system*) é o sistema responsável por controlar o ângulo de ataque das pás;
- O travão (*brake*) é o sistema de segurança da máquina;

- O eixo (*shaft*) é responsável pela transmissão da rotação do *hub* para a caixa de velocidades (quando existe);
- A caixa de velocidades (*gearbox*) transforma a baixa rotação no eixo primário para uma rotação mais elevada no eixo secundário;
- O gerador (*generator*), que está acoplado ao eixo secundário da caixa de velocidades, é responsável pela conversão da energia mecânica de rotação em energia elétrica;
- O anemómetro (*anemometer*) é o elemento que retira as leituras do vento (velocidade e direção) as quais são muito importantes para a operação do aerogerador;
- Sistema direcional de *Yaw* (*Yaw drive*) é o sistema responsável por orientar o aerogerador para a direção do vento;

Além de estes componentes, existem outros como: sistemas de controlo, essenciais para a operação do aerogerador; o transformador que converte a baixa tensão produzida pelo gerador numa tensão idêntica à rede da elétrica e outros.

1.3.3 Captação da energia do vento

A energia do vento é captada e transformada em energia mecânica pelas pás. Existem pás de diversos formatos dependendo do tipo de aerogerador em questão. Como se pode deduzir facilmente, o aumento da área abrangida pelas pás resulta no aumento da massa de ar captada pelas pás, resultando numa maior captação da energia cinética do vento. Na Figura 15 está representada a variação de potência do aerogerador com o aumento do diâmetro das pás.

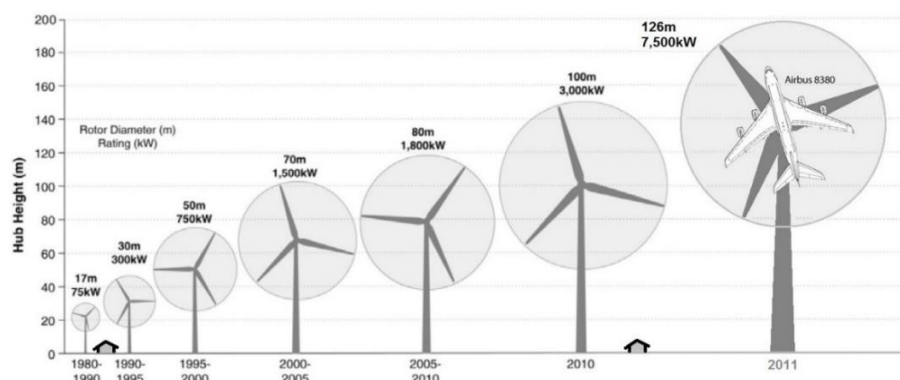


Figura 15 - Potência do aerogerador Vs diâmetro das pás [11].

Como se pode observar, no caso dos aerogeradores de eixo horizontal, o aumento do diâmetro das pás provoca um aumento exponencial da potência, o gráfico da Figura 16 ilustra esta relação entre o diâmetro das pás e a potência nominal do aerogerador

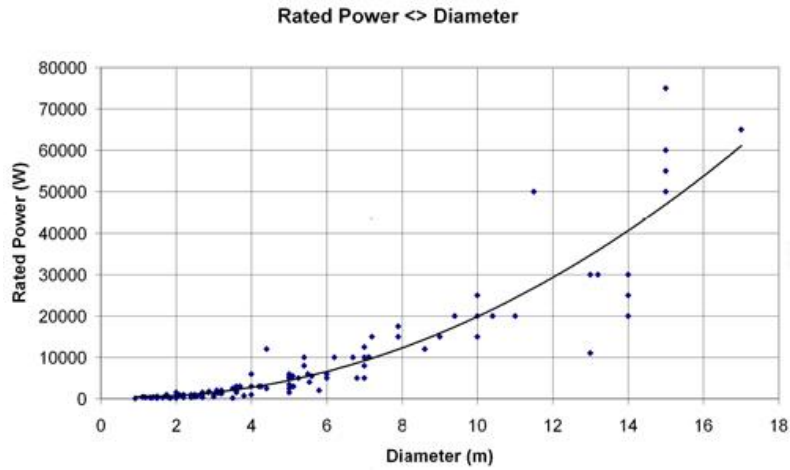


Figura 16 - Curva exponencial do aumento de potência com o aumento do diâmetro do raio das pás [12].

Se num aerogerador, para o mesmo raio de pás se aumentar o número de pás do rotor, verifica-se que resulta num aumento da energia captada. Isto deve-se, sobretudo, à existência de uma maior área física de pás em contacto com o vento. No entanto, este aumento começa a estagnar acima das três pás, tornando inviável o investimento adicional nas pás e noutros componentes mecânicos para compensar o aumento de energia captada. Na Figura 17 mostra-se as curvas do coeficiente de potência com diferentes números de pás.

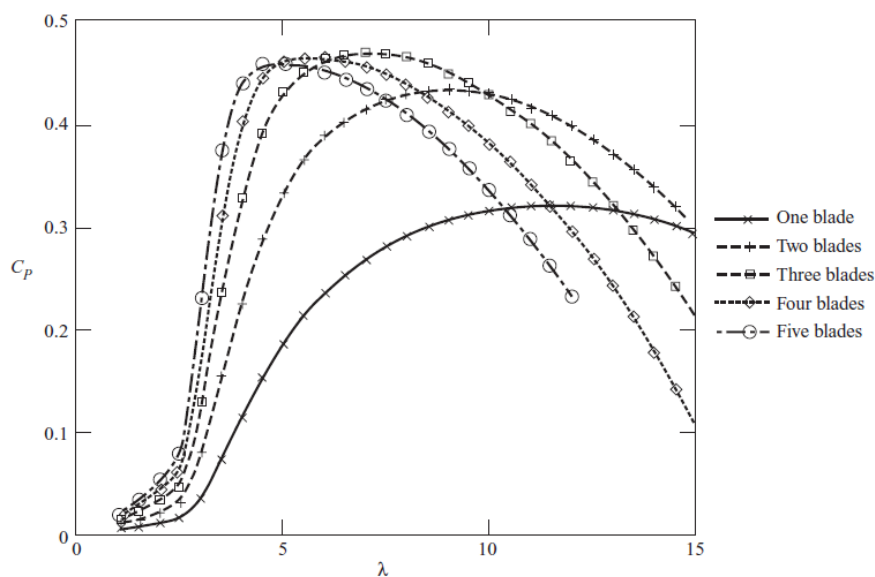


Figura 17 - Coeficiente de potência para diferentes números de pás [13].

Observando o gráfico da figura, é claramente visível que existe um aumento acentuado do coeficiente de potência quando se transita de um rotor com uma pá para um rotor com duas pás. Também se observa que quando se transita de um rotor com três pás para um rotor com quatro pás não existe um aumento do coeficiente de potência que suporte o investimento adicional

Como se viu até agora, se se aumentar a área abrangida pelas pás a potência do aerogerador aumenta devido a existir mais energia captada pelas pás. A energia produzida no aerogerador também depende da intensidade da velocidade do vento. Para melhor ilustrar esta relação da energia produzida em função da intensidade do vento, é representada na Figura 18 a curva de potência de um aerogerador.

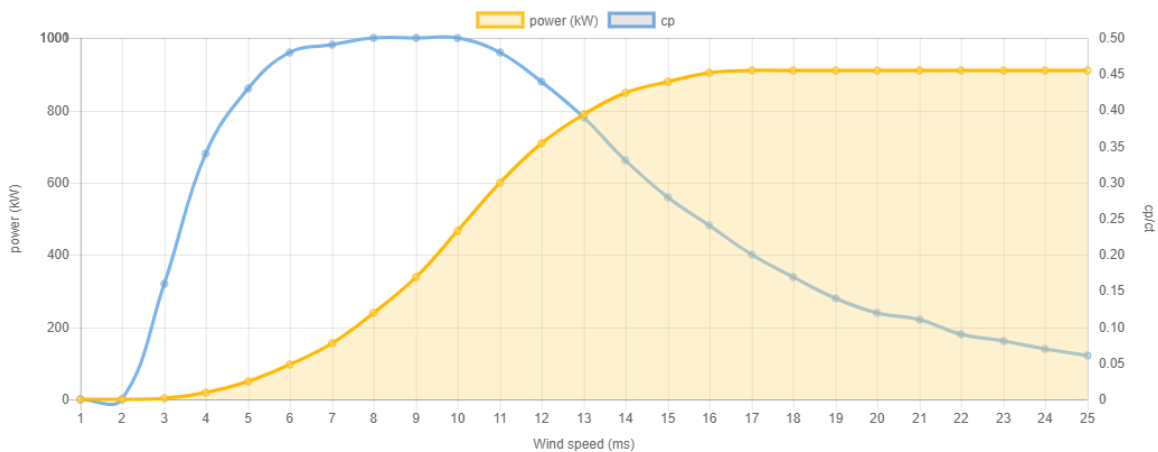


Figura 18 - Curva de potência do aerogerador E-44 [14].

Como se pode observar, até aos **13 m/s** a potência do aerogerador aumenta exponencialmente com o aumento da intensidade do vento. Após os **13 m/s** o aerogerador atinge a sua potência nominal. Atingida esta potência nominal entra em funcionamento o controlo de *pitch* para reduzir o coeficiente de potência de forma a manter o aerogerador na potência nominal, caso contrário a potência iria continuar a aumentar exponencialmente ultrapassado a potência nominal do gerador provocando, assim, o seu sobreaquecimento.

1.3.4 Análise tecnológica do aerogerador

Os sistemas de conversão de energia mecânica para energia elétrica podem ser variados, estes variam com a presença ou não de caixa de velocidade, do tipo de gerador instalado e do tipo de excitação que este recebe.

Para compreender os sistemas de conversão é fundamental saber o funcionamento dos diferentes geradores. Como se sabe das máquinas elétricas, os geradores podem ser divididos em dois grandes grupos, os geradores síncronos e os geradores assíncronos.

Nos geradores síncronos, como o próprio nome indica, a velocidade de rotação do rotor é igual à velocidade de sincronismo (a velocidade de sincronismo depende diretamente do número de pares de pólos existentes e da frequência da rede), então a velocidade de rotação tem de ser constante para que o gerador não entre em instabilidade. Nos geradores assíncronos, a velocidade de rotação do rotor é superior à velocidade de sincronismo, normalmente em **1 % a 2 %** [15].

Referem-se, agora, os diferentes tipos de conversão de energia eólica para energia elétrica:

Tipo1 – Neste tipo de conversão, de velocidade constante, é utilizado um gerador assíncrono com rotor em gaiola de esquilo, diretamente ligado à rede elétrica. Neste tipo de conversão só é possível aproveitar uma dada gama de ventos devido à necessidade de manter a velocidade de rotação de sincronismo no rotor do gerador. De forma a aumentar a gama de ventos os fabricantes inseriram um sistema que suporta duas velocidades através da utilização de dois geradores com números de polos diferentes, no entanto a passagem de um gerador para o outro é brusca e leva a esforços mecânicos na caixa de velocidades.

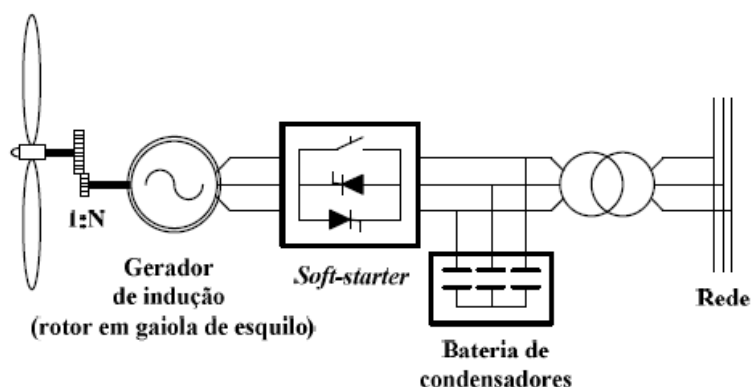


Figura 19 - Sistema de conversão de velocidade constante [15].

Vantagens: Simplicidade, robustez e baixo custo;

Desvantagens: Funcionamento a velocidade constante, carga mecânica elevada para a maioria dos regimes de vento e a qualidade da energia à saída do aerogerador é influenciada pela variabilidade do vento.

Tipo2 - Neste tipo de conversão, de velocidade variável limitada, é utilizado um gerador assíncrono de rotor bobinado onde o rotor está ligado a uma resistência variável. Ao se variar o valor da resistência no rotor é possível controlar a potência extraída do rotor e assim a velocidade de rotação, no entanto neste sistema existe a dissipação de energia sob a forma de calor na resistência.

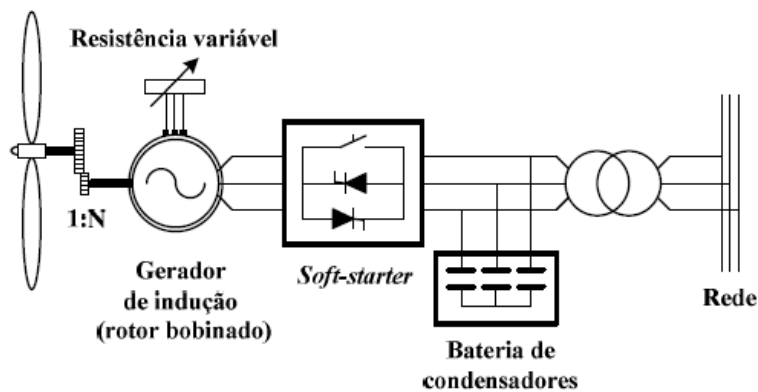


Figura 20 - Sistema de conversão de velocidade variável limitada [15].

Vantagens: Melhoramento da eficiência do sistema através do aumento da gama de ventos.

Desvantagens: Gama de variação da velocidade reduzida e perda da potência extraída no rotor pela resistência variável.

Tipo3 – Neste sistema de conversão, de velocidade variável com conversão parcial, é utilizado um gerador assíncrono com rotor bobinado, neste caso o estator está diretamente ligado à rede e o rotor é ligado à rede através de um conversor AC-DC-AC onde é controlada a frequência no rotor e por consequente a velocidade de sincronismo do mesmo.

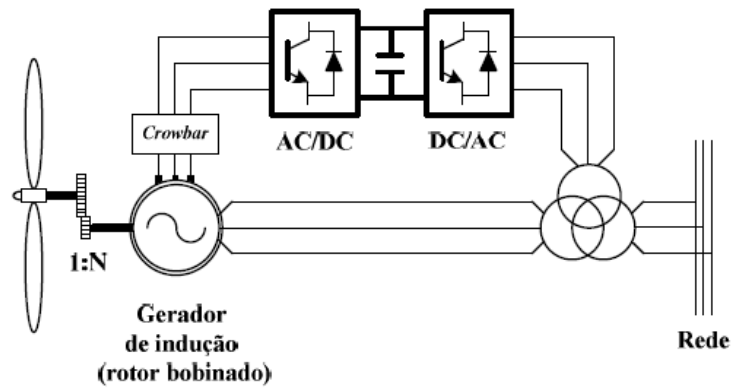


Figura 21 - Sistema de conversão de velocidade variável com conversão parcial [15].

Vantagens: Sistema atrativo do ponto de vista económico, aumento da eficiência, melhoria na qualidade da energia produzida e controlo da potência ativa e reativa.

Desvantagens: Sistema de proteção do conversor contra correntes de defeito elevadas no rotor e utilização de anéis coletores para transferir a potência do rotor para o conversor.

Tipo4 – Neste sistema de conversão, de velocidade variável com conversão integral, podem ser utilizados tanto geradores assíncronos como geradores síncronos. Neste caso o gerador é acoplado à rede através de conversores AC-DC-AC, como estes conversores garantem a total separação entre a frequência da rede e a frequência de rotação do rotor, é possível aproveitar uma maior gama de ventos.

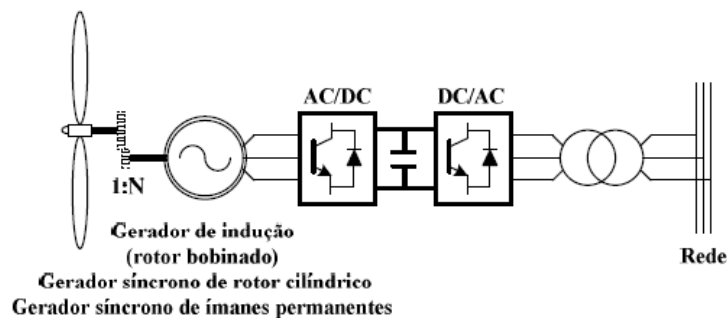


Figura 22 - Sistema de conversão de velocidade variável com conversão integral [15].

Vantagens: Aumento da eficiência, melhoria na qualidade da energia produzida, melhor controlo de potência ativa e reativa, possível ausência de caixa de velocidades e é possível a ausência de anéis coletores, no caso de geradores de magnetos permanentes.

Desvantagens: Elevado custo e perdas no conversor.

1.4 Energia solar

A radiação solar que a Terra recebe não é constante ao longo do ano, depende de uma variedade de fatores tais como a localização geográfica, condições meteorológicas, o dia e a hora, entre outros. A energia solar proveniente do sol pode ser convertida em energia elétrica pelo uso de painéis fotovoltaicos ou através de ciclos termodinâmicos que utilizam como fonte de calor a concentração de radiação solar para produzir vapor e assim mover uma turbina com um gerador acoplado.

A partir deste momento, passa-se a referir à energia solar unicamente na sua vertente de produção de energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos, sendo as outras formas de aproveitamento da energia do sol não abrangidas neste documento.

A energia solar fotovoltaica nos seus primórdios tinha um custo elevado. Devido aos elevados avanços na tecnologia esta energia renovável, na atualidade, tem um custo baixo, sendo competitiva com outras energias renováveis e com os combustíveis fósseis. Esta é uma fonte de energia amiga do ambiente. Em operação, os painéis fotovoltaicos não emitem nenhum gás poluente tendo uma pegada nula no efeito estufa.

1.4.1 Radiação solar

O Sol é a estrela mais próxima da Terra e é responsável por quase toda a energia que a Terra recebe diariamente. Com uma massa de aproximadamente 1.98×10^{30} kg estima-se que o Sol irradie uma potência média de 3.9×10^{26} Watts. A radiação solar fornece anualmente para a atmosfera cerca de $1,5 \times 10^{21}$ Wh de energia. A constante solar é a densidade média do fluxo energético proveniente da radiação solar quando medida num plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares no topo da atmosfera terrestre. O valor 1367 W/m^2 médio, designado por constante solar, foi adotado como padrão pela Organização Meteorológica Mundial. A cada hora a sol irradia a atmosfera terrestre com energia suficiente para abastecer as necessidades energéticas durante um ano [16].

A distância entre a Terra e o Sol não é sempre a mesma, pois a Terra não tem um movimento totalmente circular à volta do Sol, resultando daí pequenas variações da radiação solar extraterrestre, radiação no exterior da atmosfera. No entanto, a distância

entre a Terra e o Sol contribui pouco para a variação da radiação solar ao longo do ano na superfície terrestre, a grande responsável pela variação da radiação solar incidente na superfície ao longo do ano é a declinação solar, sendo esta também a responsável pela formação das diferentes estações do ano. A declinação solar é o ângulo verificado entre a posição do sol ao meio dia em relação ao plano do equador. Na Figura 23 está representada a órbita terrestre e a variação da declinação solar, adaptada de [17].

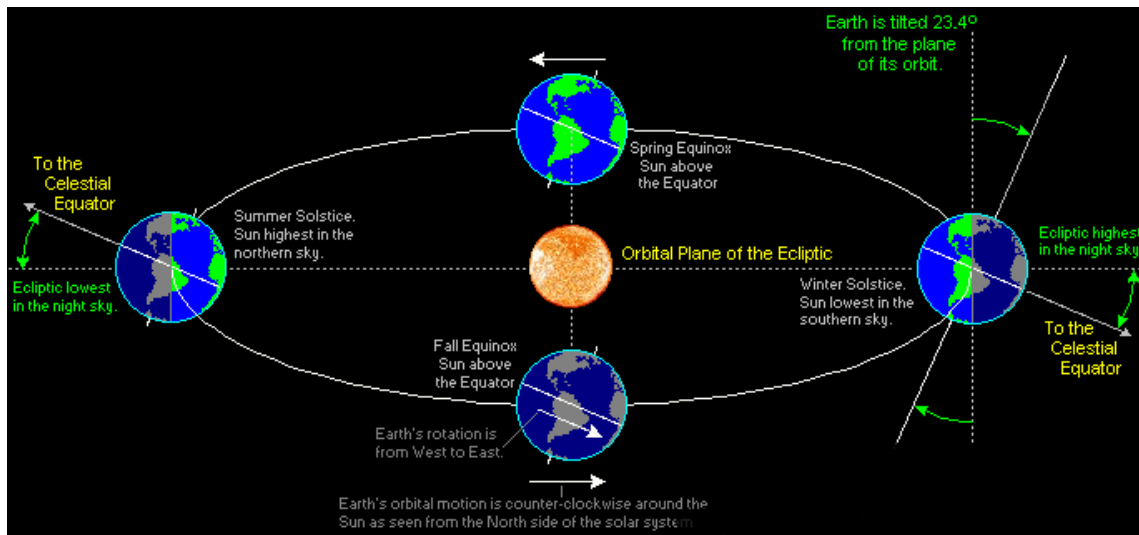


Figura 23 - Órbita Terrestre e a variação da declinação solar anual [17].

O ângulo zenital (θ_z) é o ângulo observado entre a posição do Sol com um plano vertical, quanto maior este ângulo for mais espessa é a camada de massa de ar que a radiação precisa de penetrar para chegar à superfície, esta massa de ar é constituída por aerossóis e outros gases presentes na atmosfera, provocando a difusão da radiação que depende do tamanho das moléculas de gás ou do aerossol. As moléculas também têm a propriedade de absorver a radiação, os principais absorvedores da radiação são o oxigênio, o ozono, o vapor de água e o dióxido de carbono [18].

Sabe-se que um coletor solar absorve mais energia quando a sua superfície é perpendicular à radiação solar. Assim, a melhor inclinação, tendo em conta somente um único eixo de rotação, é uma inclinação igual ao valor do ângulo zenital, como se pode ver na Figura 24.

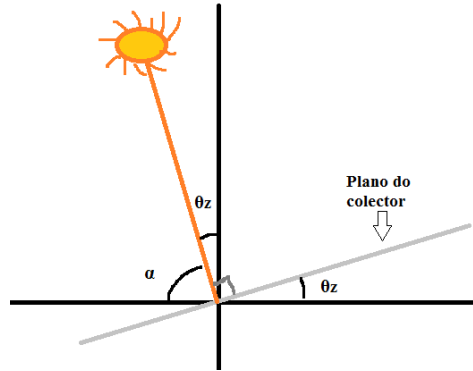


Figura 24 - Inclinação do coletor.

As condições meteorológicas influenciam fortemente a radiação incidente na superfície, consequentemente nos dias nublados ou com nuvens a radiação incidente na superfície é reduzida. Na Figura 25 observa-se um exemplo da radiação que atingem a superfície em alguns climas típicos [18].

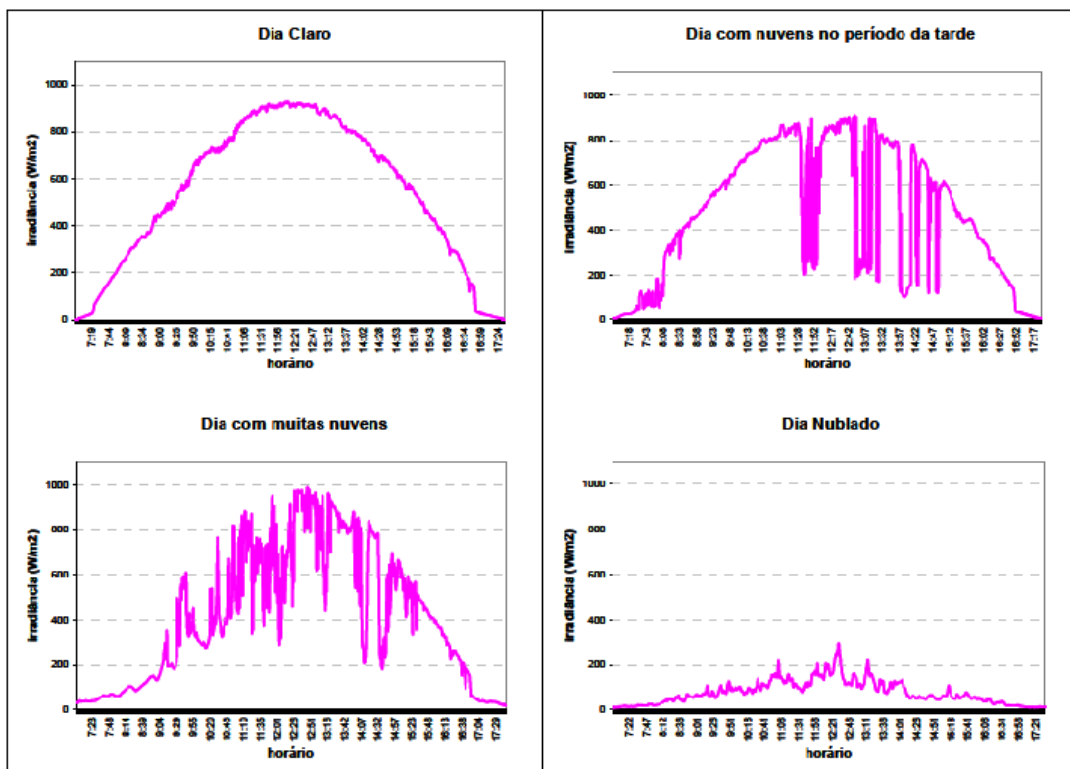


Figura 25 - Radiação na superfície em alguns climas típicos [19].

Como se observa na Figura 25, para um dia limpo, sem nuvens, existe um pico de radiação máximo de 900 W/m^2 , por outro lado, no caso do dia nublado o pico máximo de radiação foi uns meros 300 W/m^2 . Evidencia-se, assim, que a influência da metrologia na radiação incidente à superfície terrestre é elevada, o que deve-se à oclusão das radiações solares pelas nuvens/nevoeiro.

A radiação solar numa superfície pode ser de dois tipos: a radiação solar direta que consiste no feixe de radiação que atinge a superfície; e a radiação difusa que resulta do espalhamento provocado pelas moléculas de gases e os aerossóis. A radiação direta apresenta uma maior importância, excetuando-se no início do amanhecer e no fim do entardecer, momentos onde a radiação difusa ultrapassa a radiação direta [20].

O espectro da radiação solar está compreendido entre **100 nm** e **1 mm**. No entanto, o espectro de radiação mais dominante está compreendido entre os **250 nm**, e os **2500 nm**, abaixo é exibido, na Figura 26, o espectro da radiação na atmosfera e na superfície da terra. [16].

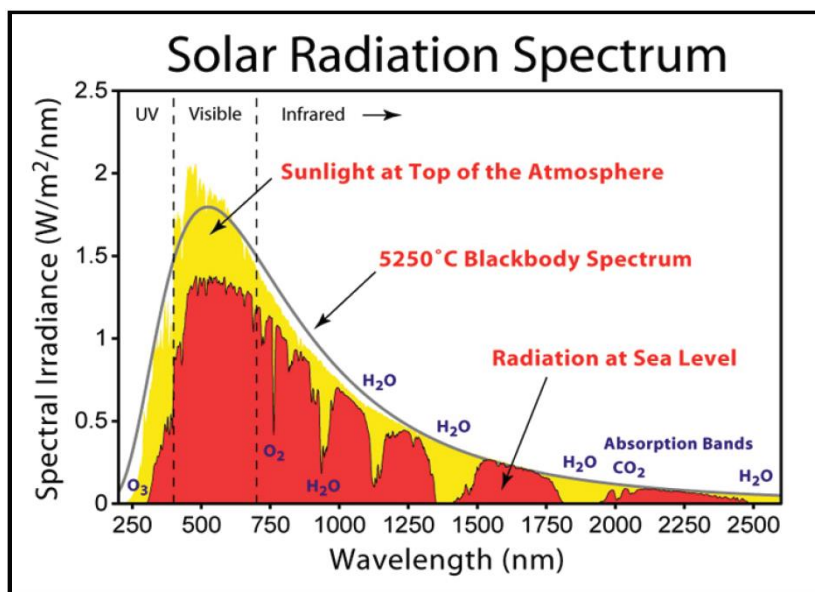


Figura 26 - Espectro da irradiação na atmosfera e na superfície da terra [16].

Como se pode observar, a intensidade máxima de irradiação está compreendida no espectro da radiação visível (**400 a 700 nm**) pelo que as células fotovoltaicas deverão operar neste espectro de radiação para existir um maior aproveitamento energético da radiação.

1.5 Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos fazem a conversão direta da radiação solar em energia elétrica que é gerada através do efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico baseia-se no princípio de que quando a luz atinge a superfície de certos materiais são libertados eletrões. As

células de silício são constituídas por duas camadas, uma camada positiva (P-type) e uma camada negativa (N-type). A camada positiva é constituída por silício dopado com Boro o que cria buracos devido ao déficit de elétrões, a camada negativa é constituída por silício dopado com Fósforo o que cria elétrões em excesso nessa camada. Quando ligadas por um circuito exterior e irradiadas com uma fonte luminosa, os elétrões fluem da camada N para a camada P, dando origem a uma corrente fotovoltaica.

O princípio de funcionamento das células de silício que constituem o painel fotovoltaico é básico: quando um fotão proveniente da radiação solar, com energia suficiente atinge um elétron na banda de valência este move-se para a banda de condução deixando um buraco que simula uma carga positiva. Assim na região onde os dois materiais se encontram origina-se um campo elétrico [21].

As células fotovoltaicas não estão ativadas durante o período da noite, neste período a junção P-N funciona como um díodo, não existindo a produção de corrente e de tensão. No entanto se uma fonte de tensão externa for aplicada à célula surgirá, então, uma corrente de saturação do díodo também conhecida por *dark current* [16].

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Becquerel em 1839 [16]. Na Figura 27 ilustra-se o diagrama do efeito fotovoltaico numa célula fotovoltaica [22].

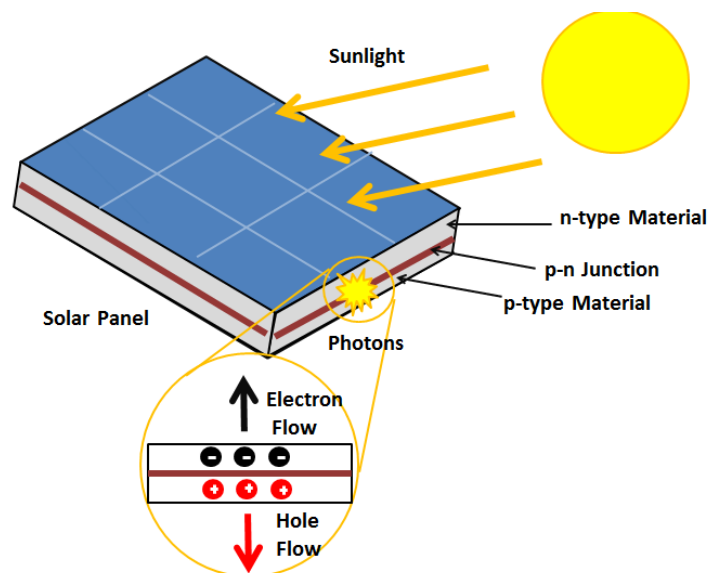


Figura 27 - Diagrama do efeito fotovoltaico [22].

1.5.1 Tipos de células Fotovoltaicas

As células solares, dependendo do tipo de material utilizado na sua construção, são classificadas em três gerações:

- Primeira Geração
- Segunda Geração
- Terceira Geração

Primeira Geração

As células fotovoltaicas tradicionalmente mais antigas são construídas com silício e, atualmente, perfazem 80% de todos os painéis fotovoltaicos instalados no mundo. As células de silício são constituídas por uma junção N-P, podendo ser divididas em três categorias em função da sua constituição [16]:

- Células fotovoltaicas Monocristalinas

A célula monocristalina é a tecnologia mais antiga e, historicamente, a mais utilizada na comercialização de painéis fotovoltaicos. A célula é formada por uma estrutura constituída por um cristal único, o que potencia eficiências superiores em comparação com os outros tipos de células fotovoltaicas [16];

- Células fotovoltaicas Policristalinas

Diferentes das células monocristalinas, as células policristalinas são constituídas por um conjunto de pequenos cristais, o que promove um custo de fabricação inferior. No entanto as células policristalinas possuem uma eficiência inferior à das células monocristalinas [16];

- Células fotovoltaicas Amorfas

As células amorfas são constituídas por uma camada fina de silício amorfo que é depositado em um material como plástico, vidro, etc. Esta tecnologia de fabrico é barata quando comparada com as células anteriormente faladas, no entanto a eficiência é inferior [16].

Segunda Geração

Células de segunda geração são também conhecidas por células de película fina, devido a terem uma espessura milimétrica. São constituídas por sucessivas camadas finas de material semicondutor, depositadas sobre um material de baixo custo. A vantagem das

células de película fina é que possibilitam a construção de módulos maleáveis e translúcidos, potenciando, assim, a energia solar em diversas aplicações nunca antes possíveis.

Comparando as células de segunda geração com as de primeira, verifica-se que estas células não possuem diferença no que concerne ao seu modo de operação. Possuem, igualmente, uma junção N-P, sendo que a maior diferença consiste no material semiconductor utilizado nas células de segunda geração.

Terceira Geração

As células de terceira geração são diferentes das anteriores, não se baseiam numa junção N-P para produzir energia. Por outras palavras, o seu funcionamento não é baseado nas propriedades dos materiais semicondutores.

Podem ser constituídas por diferentes materiais além do silício, tais como estruturas à base de nanotubos de carbono, tintas/corantes solares, plásticos condutores e corantes orgânicos. As células orgânicas são constituídas por polímeros ou materiais orgânicos. No futuro estas células podem ser economicamente competitivas o que ainda não acontece na atualidade [16].

1.5.2 Painéis Fotovoltaicos, constituição

As células fotovoltaicas são agrupadas em módulos, onde são encapsuladas com vários materiais para as proteger de elementos externos. Assim, os painéis fotovoltaicos são constituídos por um conjunto de módulos fotovoltaicos que, por sua vez, são constituídos por várias células fotovoltaicas ligadas em série. Na Figura 28 pode observar-se a constituição de um painel fotovoltaico, onde se ilustra a diferença entre célula, módulo e painel. Os painéis são equipamentos de fácil operação e manutenção, com uma fiabilidade elevada e possibilidade de expansão.

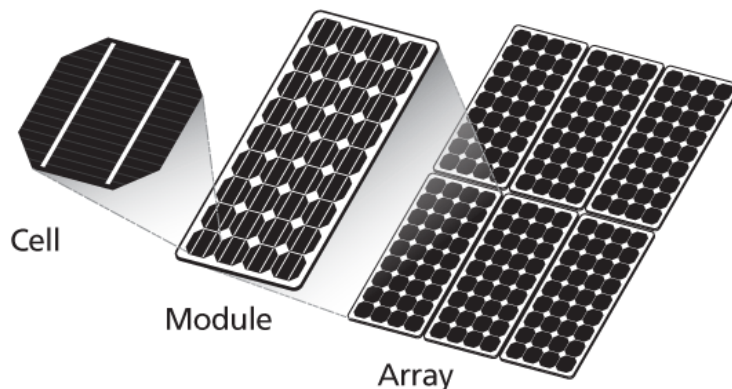


Figura 28 - Constituição de um painel fotovoltaico [23].

1.5.3 Curva característica I-V

A representação da curva I-V (corrente I – tensão V) toma, por convenção, como positiva a corrente e a tensão produzida nos terminais da célula fotovoltaica.

Como se sabe da lei de Ohm, a variação de uma resistência ligada a uma fonte de corrente resulta numa variação da tensão aplicada à mesma resistência. Assim, se se ligar uma resistência variável a uma célula fotovoltaica irá surgir aos seus terminais uma tensão aplicada variável, em função do valor da resistência, originando-se assim a curva característica I-V.

Na Figura 29 é ilustrado um exemplo de uma curva característica I-V de uma célula fotovoltaica.

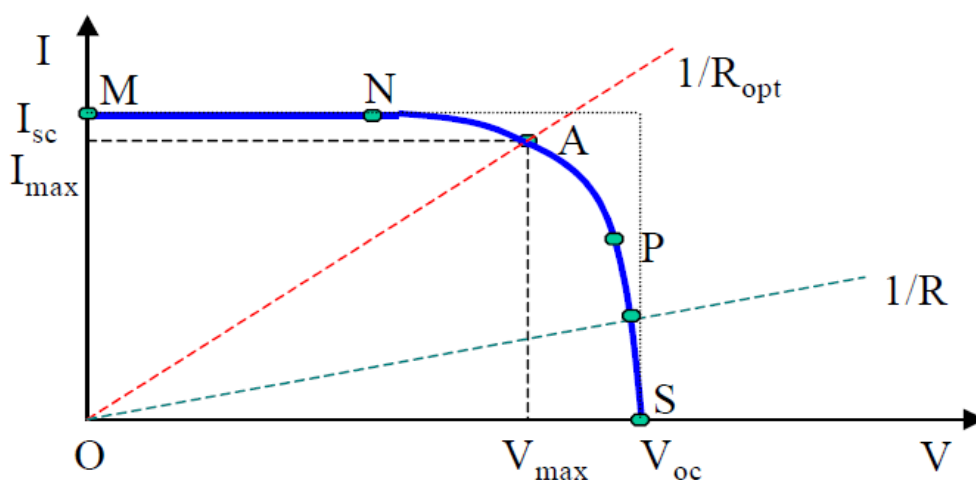


Figura 29 - Curva de característica I-V de uma célula fotovoltaica [24].

Considerando constantes os fatores externos ao circuito, como as condições meteorológicas, irradiação, temperatura da célula, etc, observa-se que a potência entregue pela célula à carga depende somente do valor da resistência. Por outras palavras, se a resistência for demasiado pequena a célula fotovoltaica irá operar na região M-N da curva de característica I-V, comportando-se assim como uma fonte de corrente próxima do curto-circuito. Por outro lado, se a resistência for elevada, a célula fotovoltaica irá operar na região P-S da curva comportando-se como uma fonte de tensão próxima do circuito quase aberto.

As células fotovoltaicas podem ser caracterizadas com os seguintes parâmetros

- Corrente de curto-circuito – É o valor máximo de corrente que a célula entrega, ocorre quando a célula está em curto-circuito ou seja $V=0$;
- Tensão de circuito aberto – Corresponde à tensão resultante quando o díodo (junção P-N) é atravessada pela corrente fotovoltaica $I_d = I_{ph}$, ocorre quando a célula está em circuito aberto ou seja $I=0$;
- Ponto de potência máxima - Corresponde ao ponto de operação **A** (V_{max} , I_{max}) da Figura 29. Por outras palavras, é o ponto onde a potência entregue à carga é máxima;
- Eficiência máxima – Razão entre a potência máxima e a potência da radiação incidente;

$$\eta = \frac{P_{max}}{A \cdot G} \quad (1)$$

Onde:

A – Área da célula (m^2);

G – Radiação solar incidente (W/m^2);

- Fill factor – Razão entre a potência máxima que pode ser produzida com o produto da corrente de curto-circuito com a tensão de circuito aberto;

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (2)$$

Se o *fill factor* for maior que 0,7 a célula é boa. No entanto este diminui quando a temperatura da célula aumenta.

O ponto de potência máxima é o ponto onde se extrai a potência máxima da célula fotovoltaica, o que significa que este é o ponto de funcionamento ótimo para se obter o maior rendimento. O ponto de potência máxima não é constante para todas as condições, ou seja, com a variação da radiação solar ou da temperatura da célula resultará uma oscilação neste ponto ótimo de funcionamento. Na Figura 30 é mostrado o efeito da radiação solar e da temperatura da célula na curva I-V da célula fotovoltaica.

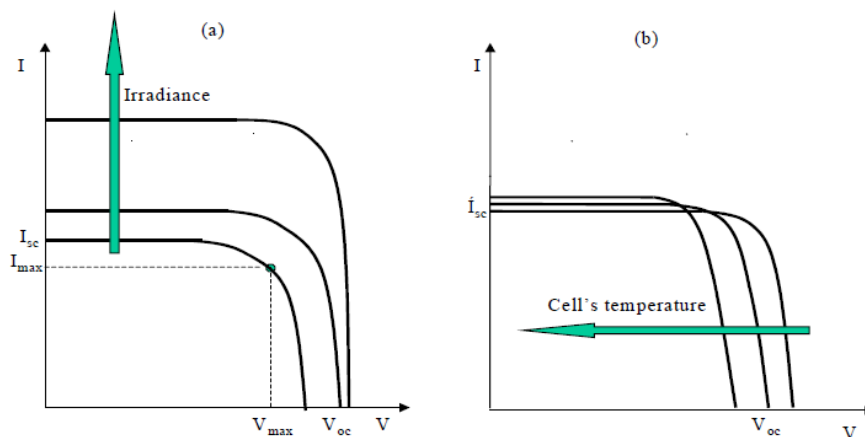


Figura 30 - Curva I-V com variação de radiação Vs com variação de temperatura da célula [24].

Como se pode observar na Figura 30, com a diminuição da radiação solar a corrente diminui, o que provoca uma variação no ponto de ótimo de funcionamento. Também se pode observar que com o aumento da temperatura da célula a tensão aplicada na célula diminui, o que provoca uma diminuição no ponto de potência máxima, esta influência da temperatura deve-se sobretudo à existência de uma maior corrente de saturação do díodo, diminuindo assim a voltagem suportada pela célula fotovoltaica.

Na prática, as células são ligadas em diferentes configurações como em série ou em paralelo. Ligando as células em paralelo, a tensão aplicada nas duas células é igual à do nó que as une, no entanto a corrente que atravessa as duas células soma-se de forma a obter a corrente no nó, como está ilustrado na Figura 31 (b). Ligando as células em série, a corrente que atravessa cada célula é igual à corrente nos terminais de saída, no entanto

as tensões das duas células somam-se de forma a obter a tensão do módulo, como está ilustrado na Figura 31 (a) [24].

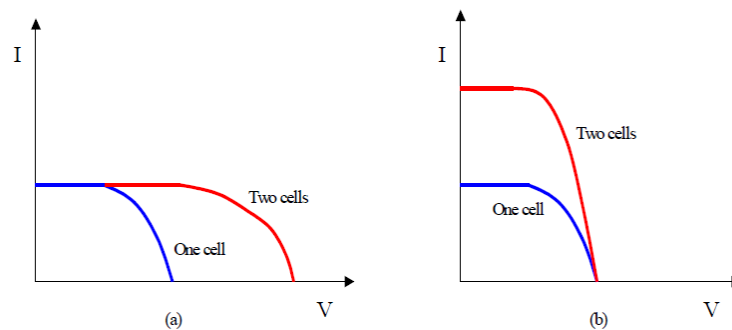


Figura 31 - Curva I-V, células conectadas em paralelo Vs células conectada em serie [24].

1.5.4 Ligação à rede elétrica

Na produção de eletricidade para a rede elétrica ou para sistemas isolados existe a necessidade de ligar os painéis a um inversor DC/AC para converter a corrente contínua em corrente alternada. Em certas aplicações, pode ainda haver a necessidade de instalar bancos de baterias para acumular a energia para as horas de maior consumo/menor produção. A produção de eletricidade por de painéis fotovoltaicos pode variar das dezenas ou centenas de kWatts, em sistemas domésticos, eletrificação rural, eletrificação industrial, etc, a dezenas de MWatts, como nos casos de centrais de produção fotovoltaica descentralizada.

2. MODELAÇÃO DE SISTEMAS EÓLICOS E SOLARES

2.1 Modelação de Aerogeradores

Na modelação dos aerogeradores é essencial caracterizar o comportamento das pás, este é o principal componente para a extração da energia do vento. Também é necessário modelar as perdas mecânicas existentes nos eixos/caixas de velocidades, que transmitem a energia mecânica extraída das pás para o gerador, e por fim o gerador, que é o responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica. Em alguns casos também é importante caracterizar o sistema de controlo para prever a resposta do aerogerador nas diversas condições.

2.1.1 Modelação aerodinâmica

De acordo com [25] a modelação das pás de um aerogerador pode ser deduzida utilizando o seguinte raciocínio:

Sabe-se da segunda lei de Newton que:

$$\text{Força} = \text{massa} \times \text{aceleração} \quad (3)$$

E que a energia cinética E presente numa massa de ar é dada por:

$$E = m \times a \times s \quad (4)$$

Onde s é a distância percorrida, m é a massa e a a aceleração. Da cinemática do movimento dos sólidos sabe-se que $V^2 = U^2 + 2as$, onde V é a velocidade do objeto e U a velocidade inicial do objeto. Assumindo como condições iniciais que a velocidade é igual a zero ($U=0$) resulta [25]:

$$a = \frac{V^2}{2s} \quad (5)$$

Relacionando com a expressão da energia cinética obtém-se:

$$E = \frac{1}{2} \times m \times V_w^2 \quad (6)$$

onde V_w representa a velocidade do vento.

Assumindo que a densidade do ar é constante, a potência P presente do vento pode ser descrita como:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \times \frac{dm}{dt} \times V_w^2 \quad (7)$$

em que $\frac{dm}{dt}$ corresponde ao fluxo de massa resultante do vento, que também pode ser dado por $\rho \cdot A \cdot V_w$, onde ρ é a densidade do ar e A área por onde passa a massa de ar, resultando assim a seguinte expressão para a potência do vento.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (8)$$

A densidade do ar está relacionada com as condições climáticas e com a elevação em relação ao mar (H_m), pode-se estabelecer a seguinte relação para estimar a densidade do ar em diferentes altitudes [25]:

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{\frac{-0.297}{3048} H_m} \quad (9)$$

onde ρ_0 representa a densidade do ar ao nível do mar.

No caso de um aerogerador, a potência extraída pelas pás P_w é dada pela diferença da velocidade do vento antes V_u depois V_d de passar pelas pás, como se mostra em (8):

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w \cdot (V_u^2 - V_d^2) \quad (10)$$

Do fluxo da massa de ar pode escrever-se:

$$\rho \cdot A \cdot V_w = \rho \cdot A \cdot \frac{(V_u + V_d)}{2} \quad (11)$$

Relacionando as expressões anteriores têm-se:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (V_u^2 - V_d^2) \frac{(V_u + V_d)}{2} \quad (12)$$

Obtendo-se:

$$P_w = \frac{1}{2} \left[\rho \cdot A \left\{ \frac{V_u}{2} \cdot (V_u^2 - V_d^2) + \frac{V_d}{2} \cdot (V_u^2 - V_d^2) \right\} \right] \quad (13)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \left[\rho \cdot A \cdot V_u^3 \left\{ \frac{1 - \left(\frac{V_d}{V_u}\right)^2 + \left(\frac{V_d}{V_u}\right) - \left(\frac{V_d}{V_u}\right)^3}{2} \right\} \right] \quad (14)$$

Obtendo-se o coeficiente de potência C_p como::

$$C_p = \frac{1 - \left(\frac{V_d}{V_u}\right)^2 + \left(\frac{V_d}{V_u}\right) - \left(\frac{V_d}{V_u}\right)^3}{2} = \frac{\left(1 + \frac{V_d}{V_u}\right) \left(1 - \left(\frac{V_d}{V_u}\right)^2\right)}{2} \quad (15)$$

Finalmente obtêm-se a potência extraída do vento P_w que é dada por (14):

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_u^3 \cdot C_p \quad (16)$$

C_p é o coeficiente de potência do aerogerador, ou a eficiência de extração da potência do vento. Este representa a fração do vento que atinge o aerogerador e que é absorvida pelas pás. O valor de C_p não é estático, com a variação do vento e da rotação o rotor existe uma variação da *TSR* (tip speed ratio ou razão da velocidade de ponta da pá) que influencia diretamente os valores de C_p . O *TSR* é dado por:

$$\lambda = \frac{V_d}{V_u} = \frac{\text{Velocidade da Tip da pá}}{\text{Velocidade do vento}} = \frac{\omega_m \cdot \text{Raio}}{V_w} \quad (17)$$

Na Figura 32 representa-se diferentes curvas típicas do C_p em função da *TSR* para diferentes tipos de aerogeradores.

O limite de Betz diz que a eficiência máxima teórica de extração do vento pelas pás é de $C_p=0,59$. Os aerogeradores modernos conseguem atingir valores entres os **0,35** e os **0,45**. No final somente **10 a 30 %** da energia que atinge o aerogerador é que é convertida em eletricidade.

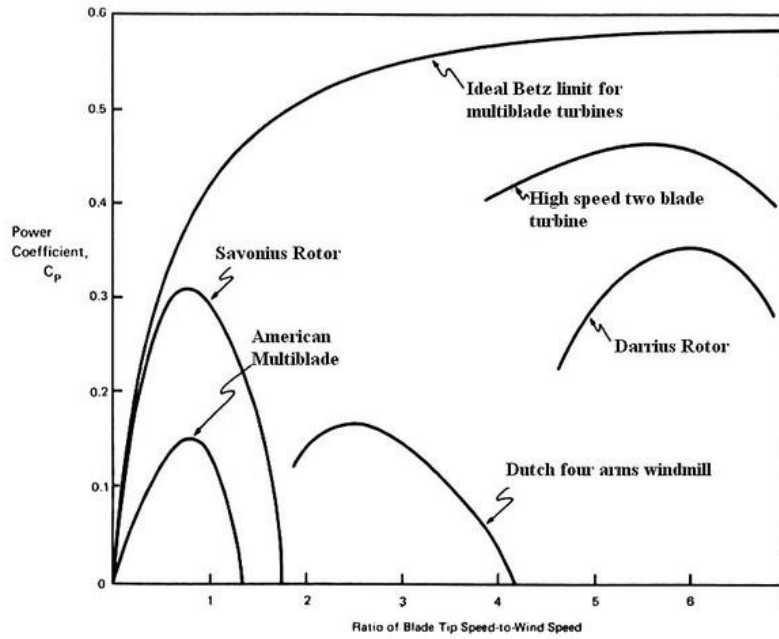


Figura 32- Curvas típicas de Cp em função da TSR [26].

Aerogeradores de eixo vertical

Continuando o raciocínio, no caso de um aerogerador de eixo vertical, a potência P_w e o binário T_w extraídos pelas pás podem ser dados por [25] e [10]:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \cdot C_p(\lambda) \quad (\text{W}) \quad (18)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^2 \cdot C_t(\lambda) \quad (\text{Nm}) \quad (19)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\omega_m} \quad (\text{Nm}) \quad (20)$$

Onde:

ρ – Densidade do ar (kg/m^3);

A – Área abrangida pelas pás (m^2);

V_w – Velocidade do vento (m/s);

C_p – Coeficiente de potência;

C_t – Coeficiente de binário;

ω_m – Rotação do eixo do rotor das pás (*hub*) (rad/s);

Aerogeradores de eixo horizontal

Nos aerogeradores de eixo horizontal é usual utilizar-se como parâmetro o raio das pás e considerar o *pitch* variável. Assim o, C_p não depende somente do *TSR* mas também irá depender do ângulo de *pitch*. Neste caso a potência e o binário extraídos pelas pás podem ser dados por [27]:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_u^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \text{ (W)} \quad (21)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_u^2 \cdot C_t(\lambda, \beta) \text{ (Nm)} \quad (22)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_u^3 \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\omega_m} \text{ (Nm)} \quad (23)$$

onde:

R – Raio da pá (m);

Relação entre C_t e C_p

O C_t e C_p dependem ambos da *TSR* e do valor do ângulo de *pitch* β no caso dos aerogeradores com *pitch* variável.

Nos aerogeradores de *pitch* fixo, onde estão incluídos os aerogeradores de eixo vertical e parte dos aerogeradores de eixo horizontal, o C_t e C_p dependem unicamente do *TSR*, assim pode-se estabelecer a seguinte relação entre o C_t e C_p :

$$C_p = C_t \cdot \lambda \quad (24)$$

Determinação do C_p

O C_p é o parâmetro de maior importância para estudar o comportamento do aerogerador para situações de regulação de potência, este é um coeficiente não linear que é influenciado pela velocidade de rotação do aerogerador e pela velocidade do vento. Usualmente o fabricante fornece tabelas de C_p para se efetuar o estudo do comportamento do aerogerador. Essas tabelas podem ser introduzidas em funções “look up tables” do Matlab para se executar simulações em ambiente Simulink. Outra forma de se obter o C_p , é através de modelos matemáticos que definem o C_p em função da *TSR* e do ângulo de *pitch*. Este comportamento poder ser determinado através de [25]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C1 \cdot \left(C2 \frac{1}{\beta} - C3 \cdot \beta - C4 \cdot \beta^x - C5 \right) \cdot e^{-C6 \cdot \frac{1}{\beta}} \quad (25)$$

$$\frac{1}{\vartheta} = \frac{1}{\lambda - 0.08\beta} - \frac{1}{1 + \beta^3} \quad (26)$$

Onde:

λ – Razão da velocidade da ponta da pá (*TSR*), $\lambda = V_d/V_u$;

β – Ângulo de *pitch* (°);

$C1, C2, C3, C4, C5, C6, x$ – Coeficientes do aerogerador, dependem do tipo de aerogerador;

2.1.2 Modelação das transformações mecânicas

Os aerogeradores são constituídos por diversas partes mecânicas, são estas o *hub* com as pás, as engrenagens de *pitch*, a caixa de velocidades, o eixo do rotor com o gerador e as engrenagens do sistema de *yaw*.

Por razões de simplificação, ignoraram-se alguns destes componentes mecânicos e dá-se relevância à massa do *hub* com as pás, à massa da caixa de velocidades e à massa do eixo do rotor com o gerador [28].

Para estudar o comportamento dos componentes mecânicos do aerogerador são utilizados os seguintes modelos:

- Modelo de três massas;
- Modelo de duas massas;
- Modelo de uma massa com perdas por fricção dinâmicas;
- Modelo de uma massa com perdas por fricção constantes;
- Modelo de uma massa sem perdas;

2.1.2.1 Modelo de três massas

Segundo [29], o modelo de três massas inclui a dinâmica das massas dos três maiores componentes mecânicos, o *hub* com as pás, a caixa de velocidades e o eixo do rotor com o gerador. Na Figura 33 observa-se o esquema do modelo de três massas.

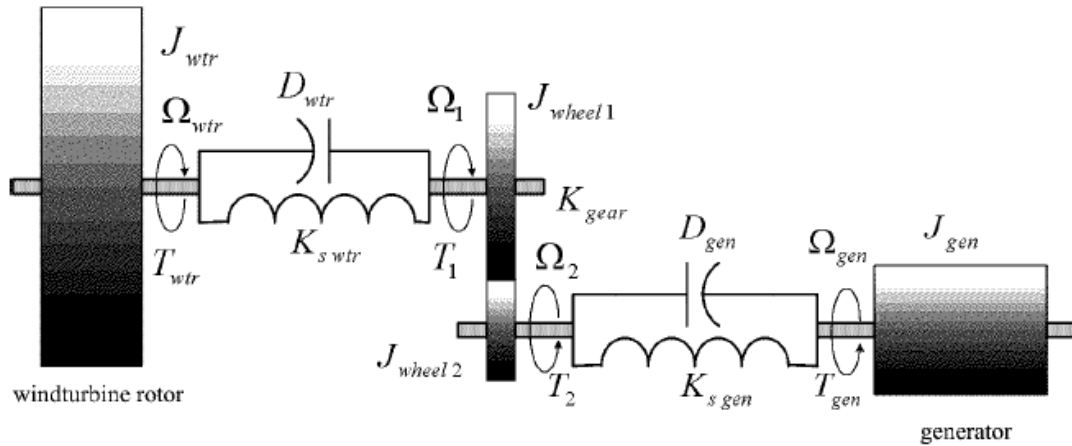


Figura 33 - Esquema do modelo de três massas [29].

Neste esquema tem-se o seguinte conjunto de variáveis:

T_{wtr} – Binário do *hub* com as pás (Nm);

J_{wtr} – Momento de inércia do *hub* (kg.m²);

Ω_{wtr} – Velocidade de rotação do *hub* (rad/s);

$K_{s wtr}$ – Constante de elasticidade do eixo do *hub* (indica a rigidez de torção do eixo) (Nm/rad);

T_{gen} – Binário no gerador (Nm);

J_{gen} – Momento de inércia do gerador (kg.m²);

Ω_{gen} – Velocidade de rotação do gerador (rad/s);

K_{gen} – Constante de elasticidade do eixo do gerador, rigidez de torção (Nm/rad);

T_1 – Binário que entra na caixa de velocidades (low gear) (Nm);

T_2 – Binário que sai da caixa de velocidades (high gear) (Nm);

D_{wtr} – Coeficiente de rigidez do eixo do *hub* (Nm.sec/rad);

D_{gen} – Coeficiente de rigidez do eixo do gerador (Nm.sec/rad);

K_{gear} – Razão de transformação da caixa de velocidades;

$$T_2 = \frac{1}{K_{gear}} \cdot T_1 \quad (27)$$

$$\Omega_2 = K_{gear} \cdot \Omega_1 \quad (28)$$

Considerando o efeito da elasticidade dos eixos descreve-se o sistema mecânico com o seguinte conjunto de equações dinâmicas [29]:

$$\begin{aligned}
 T_{wtr} &= J_{wtr} \cdot \frac{d\Omega_{wtr}}{dt} + D_{wtr} \cdot \Omega_{wtr} + K_{wtr}(\theta_{wtr} - \theta_1) \\
 T_1 &= J_1 \cdot \frac{d\Omega_1}{dt} + D_{wtr} \cdot \Omega_1 + K_{wtr}(\theta_1 - \theta_{wtr}) \\
 T_2 &= J_2 \cdot \frac{d\Omega_2}{dt} + D_{gen} \cdot \Omega_2 + K_{gen}(\theta_2 - \theta_{gen}) \\
 -T_{gen} &= J_{gen} \cdot \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + D_{gen} \cdot \Omega_{gen} + K_{gen}(\theta_{gen} - \theta_2)
 \end{aligned} \tag{29}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d\theta_{wtr}}{dt} &= \Omega_{wtr} & \frac{d\theta_{gen}}{dt} &= \Omega_{gen} \\
 \frac{d\theta_1}{dt} &= \Omega_1 & \frac{d\theta_2}{dt} &= \Omega_2
 \end{aligned}$$

2.1.2.2 Modelo de duas massas

Em algumas situações e com o propósito de simplificação, o momento de inércia dos eixos e das caixas de velocidades podem ser negligenciados porque em comparação com o momento de inércia do *hub* e do gerador, os momentos de inércia da caixa de velocidades e dos eixos assumem valores pequenos. Com isto resulta um sistema com uma rigidez equivalente, reduzindo-se assim o modelo para um modelo que tem em conta a massa do *hub* com as pás e a massa do gerador. Na Figura 34 representa-se o esquema do modelo de duas massas.

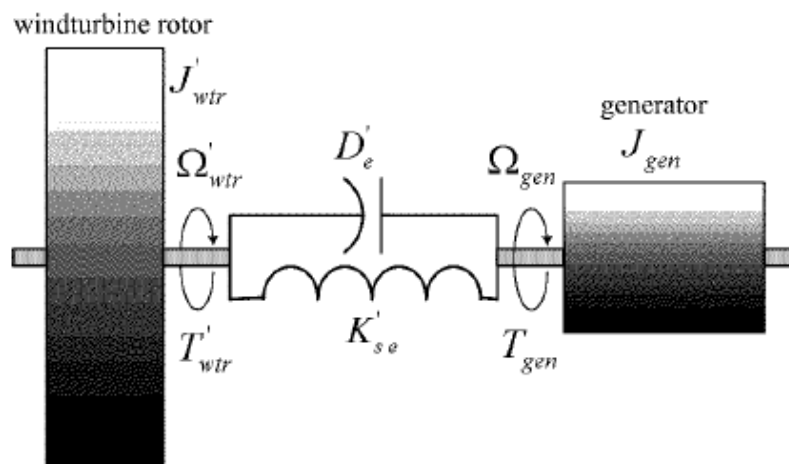


Figura 34 - Esquema do modelo de duas massas [29].

Normalmente um modelo aceitável para as transformações mecânicas de um aerogerador é o modelo de duas massas representado acima, modelo este que é descrito pelo seguinte conjunto de equações dinâmicas, tomando como referência o lado do gerador [29]:

$$\begin{aligned}
T'_{wtr} &= J'_{wtr} \cdot \frac{d\Omega'_{wtr}}{dt} + D'_e \cdot (\Omega'_{wtr} - \Omega_{gen}) + K'_{se} (\theta'_{wtr} - \theta_{gen}) \\
-T_{gen} &= J_{gen} \cdot \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + D'_e \cdot (\Omega_{gen} - \Omega'_{wtr}) + K'_{se} (\theta_{gen} - \theta'_{wtr}) \\
\frac{d\theta'_{wtr}}{dt} &= \Omega'_{wtr} & \frac{d\theta_{gen}}{dt} &= \Omega_{gen}
\end{aligned} \tag{30}$$

Onde o coeficiente de elasticidade equivalente pode ser dado por:

$$\frac{1}{K'_{se}} = \frac{1}{K_{wtr}} + \frac{1}{K_{gear}} \tag{31}$$

E o momento de inércia e binário equivalente do *hub* são dados por:

$$J'_{wtr} = \frac{1}{K_{gear}^2} \cdot J_{wtr} \tag{32}$$

$$T'_{wtr} = \frac{1}{K_{gear}^2} \cdot T_{wtr} \tag{33}$$

Após alguma manipulação matemática e considerando $\theta_s = \theta'_{wtr} - \theta_{gen}$ o modelo de duas massas passa a ser descrito na seguinte forma de equações de estado:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\Omega'_{wtr}}{dt} \\ \frac{d\Omega_{gen}}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & K_{gear} & -1 \\ \frac{K'_{se}}{J'_{wtr} \cdot K_{gear}} & \frac{D'_e}{J'_{wtr}} & -\frac{D'_e}{J'_{wtr} \cdot K_{gear}} \\ -\frac{K'_{se}}{J_{gen}} & -\frac{D'_e \cdot K_{gear}}{J_{gen}} & \frac{D'_e}{J_{gen}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_s \\ \Omega'_{wtr} \\ \Omega_{gen} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J'_{wtr} \cdot K_{gear}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_{gen}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T'_{wtr} \\ T_{gen} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{34}$$

2.1.2.3 Modelo de uma massa com perdas dinâmicas de fricção

Simplificando o modelo anterior para um único momento de inércia (uma massa) obtêm-se o modelo de uma massa que pode ser descrito pela seguinte equação [30]:

$$T_{gen} - T'_{wtr} = J_{ech} \cdot \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + D_{ech} \cdot \Omega_{gen} \quad (35)$$

Onde o momento de inércia equivalente é dado por:

$$J_{ech} = J_{gen} + \frac{J_{wtr}}{K_{gear}^2} \quad (36)$$

O D_{ech} é o coeficiente combinado de fricção equivalente, desta forma o modelo de uma massa inclui o coeficiente de fricção não ignorando as perdas mecânicas dinâmicas do sistema.

2.1.2.5 Modelo de uma massa com perdas por fricção constantes

Substituindo o coeficiente de fricção por um valor constante de fricção obtêm-se um modelo com as perdas de fricção constantes. A expressão do modelo de uma massa com fricção constante é dada por:

$$T_{gen} - T'_{wtr} - T_{Loss} = J_{ech} \cdot \frac{d\Omega_{gen}}{dt} \quad (37)$$

Onde:

T_L – representa as perdas de binário por fricção (Nm);

2.1.2.4 Modelo de uma massa sem perdas

Simplificando ainda mais, ignorando as perdas por fricção, obtêm-se um modelo ideal de uma massa. Por outras palavras, um modelo de uma massa sem perdas de fricção [29]:

$$T_{gen} - T'_{wtr} = J_{ech} \cdot \frac{d\Omega_{gen}}{dt} \quad (38)$$

Realizando-se algumas transformações matemáticas e colocando a derivada da rotação do rotor em evidência têm-se:

$$\frac{d\Omega_{gen}}{dt} = \left(\frac{T_{gen} - T'_{wtr}}{J_{ech}} \right) = \left(\frac{T_{gen} - \frac{T_{wtr}}{K_{gear}^2}}{\frac{J_{wtr}}{K_{gear}^2} + J_{gen}} \right) \quad (39)$$

2.1.3 Modelação de geradores

Existe, atualmente, uma diversidade enorme de geradores no mercado que irão corresponder às variadas necessidades de cada utilização. Na produção de corrente alternada, pode-se dividir os geradores em dois grandes grupos, os geradores síncronos e os geradores assíncronos ou indutivos.

Como foi visto anteriormente, os aerogeradores podem ser classificados em três tipos de modos de operação: os aerogeradores de velocidade constante; os aerogeradores de velocidade semi-variável e os aerogeradores de velocidade variável. A escolha do modo de operação irá influenciar a o tipo de gerador utilizado. De forma reforçar a compreensão da influência do gerador no modo de operação, aborda-se cada modo de operação [31].

a) Aerogerador de velocidade constante.

Neste tipo de aerogerador, são utilizados geradores indutivos de gaiola de esquilo ligados diretamente à rede elétrica, sendo obrigatório a utilização de caixas de velocidades neste tipo de operação. Quando a energia do vento é superior à potência nominal o aerogerador é limitado através de regulação *stall* ou *pitch* para reduzir o C_p . Devido à potência reativa absorvida pela rede, este tipo de gerador diminui a tensão à saída em comparação com os geradores do ponto c) [31].

b) Aerogerador de velocidade semi-variável.

Neste tipo de aerogerador são utilizados geradores indutivos com o rotor bobinado ligado a uma resistência variável. Os enrolamentos do rotor são conectados em serie com a resistência variável, enquanto os enrolamentos do estator são conectados diretamente à rede elétrica. Através do controlo da energia extraída do rotor consegue-se uma variabilidade de mais ou menos 10 % da velocidade síncrona [31].

c) Aerogerador de velocidade variável.

Este tipo de aerogerador pode ser dividido em duas categorias; os aerogeradores com conversores de escala parcial; e os aerogeradores com conversores de escala total.

No primeiro caso, existe um gerador indutivo de rotor bobinado alimentado duplamente, ou seja, os enrolamentos do rotor são ligados a um conversor AC/DC/AC que por sua vez está ligado à rede elétrica, já os enrolamentos do estator continuam a ser ligados diretamente à rede elétrica. Consegue-se assim um controle da frequência do rotor sendo assim a velocidade de sincronismo do rotor controlada [31].

No segundo caso, existe um gerador síncrono ou um gerador síncrono de magnetos permanentes com os enrolamentos do estator ligados a um conversor AC/DC/AC, estando estes desacoplados da rede elétrica. Com este conversor total não é necessário a utilização de caixas de velocidades, assim a velocidade de rotação do rotor é baixa produzindo-se um binário mais elevado. Os geradores síncronos são de pólos salientes com um circuito de excitação, os geradores síncronos de magnetos permanentes não possuem um circuito de excitação não sendo necessário a utilização de escovas ou anéis-rolantes o que reduz os custos de manutenção. Em qualquer um dos casos, a utilização do conversor total é ótima para responder aos requisitos da rede elétrica com maior controlabilidade das harmônicas, do fator de potência, da amplitude e fase da tensão e podendo incluir sistemas “*fault-ride through*” que permitem que o aerogerador se mantenha ligado à rede na presença de falhas de tensão [31].

2.1.3.1 Gerador assíncrono

Gerador assíncrono, modelo $dq0$

Como se sabe das máquinas elétricas, os enrolamentos das três fases do gerador assíncrono são idênticos entre si com um desfasamento de 120° entre cada fase. Considera-se, assim, que a resistência dos enrolamentos de todas as fases são iguais entre si no rotor e no estator.

Pode-se simular o gerador assíncrono recorrendo ao sistema de equações do gerador assíncrono utilizando as coordenadas $dq0$, na Figura 35 está representado o esquema dos enrolamentos no sistema de coordenadas $dq0$.

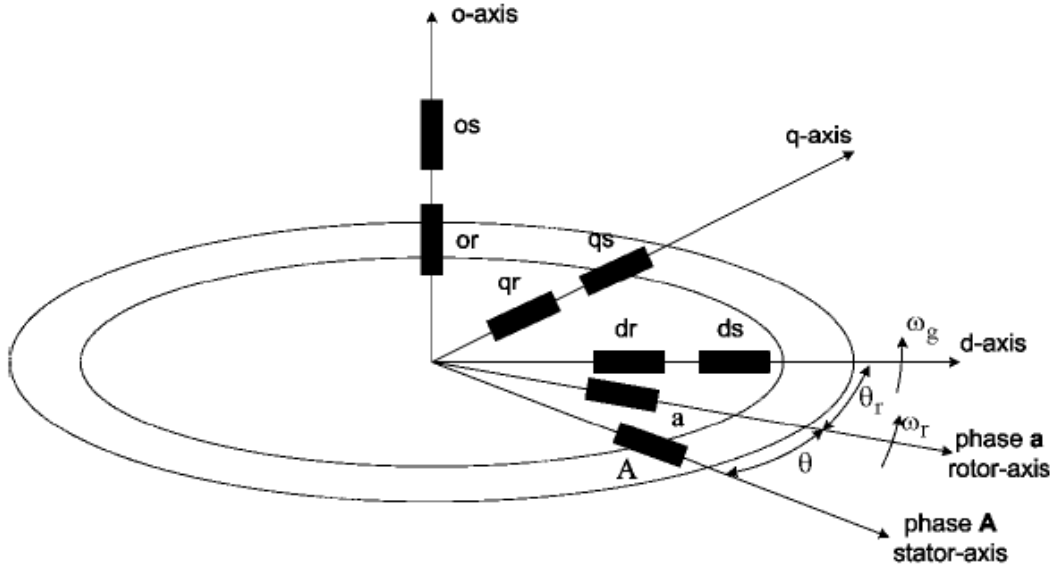


Figura 35 – Esquema coordenadas dq0 do gerador assíncrono [29].

Para simplificar, no sistema $dq0$, pode-se negligenciar a parte do eixo 0 , uma vez que em operação normal os geradores são balanceados. O modelo matemático dinâmico da máquina assíncrona é dado pelo seguinte conjunto de equações [32] e [33]:

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} - \omega_s \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (40)$$

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \omega_s \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (41)$$

$$V_{dr} = r_r \cdot i_{dr} - \omega_k \lambda_{qr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \quad (42)$$

$$V_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + \omega_k \lambda_{dr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} \quad (43)$$

$$\lambda_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \quad (44)$$

$$\lambda_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \quad (45)$$

$$\lambda_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (46)$$

$$\lambda_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (47)$$

Onde:

$$\omega_k = (\omega_s - \omega_r) \quad (48)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (49) \quad L_r = L_{lr} + L_m \quad (50)$$

Onde:

ω_r – Velocidade de rotação do rotor do gerador (rad/s);

ω_s – Velocidade de rotação do eixo de referência, depende da frequência (rad/s);

- ω_k – Velocidade de rotação de slip (rad/s);
- r_s – Resistência dos enrolamentos do estator (Ω);
- r_r – Resistência dos enrolamentos do rotor (Ω);
- $\lambda_{(dq0)s}$ – Fluxo magnético de fase ($dq0$) no estator (Wb);
- $\lambda_{(dq0)r}$ – Fluxo magnético de fase ($dq0$) no rotor (Wb);
- $i_{(dq0)s}$ – Corrente de fase ($dq0$) no estator (A);
- $i_{(dq0)r}$ – Corrente de fase ($dq0$) no rotor (A);
- L_{ls} – Indutância de fuga do estator (H) ;
- L_m – Indutância de magnetização do estator (H);
- L_{lr} – Indutância de fuga do rotor (H);
- L_s – Indutância própria do estator (H);
- L_r – Indutância própria do rotor (H);

Para simplificar, este conjunto de equações pode ser apresentado na forma matricial utilizando a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_k \\ 0 & 0 & \omega_k & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} \quad (51)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (52)$$

Que na forma condensada fica:

$$[V] = [R] \cdot [I] + \frac{d[\lambda]}{dt} + [\Omega][\lambda] \quad (53)$$

$$[\lambda] = [L] \cdot [I] \quad (54)$$

Realizando algumas manipulações matemáticas e colocando as derivadas das correntes em evidência obtêm-se:

$$\frac{dI_{ds}}{dt} = \frac{L_m \cdot V_{dr} - L_r \cdot V_{ds} - L_m \cdot r_r \cdot I_{dr} + L_r \cdot r_s \cdot I_{ds} + L_m^2 \cdot \omega_k \cdot I_{qs} + L_m \cdot L_r \cdot \omega_k \cdot I_{qr} - L_m \cdot L_r \cdot \omega_s \cdot I_{qr} - L_r \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot I_{qs}}{L_m^2 - L_r \cdot L_s} \quad (55)$$

$$\frac{dI_{qs}}{dt} = \frac{L_m \cdot V_{qr} - L_r \cdot V_{qs} - L_m \cdot r_r \cdot I_{qr} + L_r \cdot r_s \cdot I_{qs} - L_m^2 \cdot \omega_k \cdot I_{ds} - L_m \cdot L_r \cdot \omega_k \cdot I_{dr} + L_m \cdot L_r \cdot \omega_s \cdot I_{dr} + L_r \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot I_{ds}}{L_m^2 - L_r \cdot L_s} \quad (56)$$

$$\frac{dI_{dr}}{dt} = \frac{L_m \cdot V_{ds} - L_s \cdot V_{dr} - L_m \cdot r_s \cdot I_{ds} + L_s \cdot r_r \cdot I_{dr} + L_m^2 \cdot \omega_s \cdot I_{qr} - L_m \cdot L_s \cdot \omega_k \cdot I_{qs} - L_r \cdot L_s \cdot \omega_k \cdot I_{qr} + L_m \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot I_{qs}}{L_m^2 - L_r \cdot L_s} \quad (57)$$

$$\frac{dI_{qr}}{dt} = \frac{L_m \cdot V_{qs} - L_s \cdot V_{qr} - L_m \cdot r_s \cdot I_{qs} + L_s \cdot r_r \cdot I_{qr} - L_m^2 \cdot \omega_s \cdot I_{dr} + L_m \cdot L_s \cdot \omega_k \cdot I_{ds} + L_r \cdot L_s \cdot \omega_k \cdot I_{dr} - L_m \cdot L_s \cdot \omega_s \cdot I_{ds}}{L_m^2 - L_r \cdot L_s} \quad (58)$$

O binário eletromagnético da máquina assíncrona é dado pela seguinte equação [32].

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (59)$$

Onde p é o número de pares de pólos.

Gerador assíncrono, modelo em estado estacionário

Em regimes de operação permanente e balanceados as equações da tensão para o gerador assíncrono podem ser obtidas com [32]:

$$\widetilde{V}_{as} = \left(r_s + j \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot X_{ls} \right) \cdot \widetilde{I}_{as} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot X_m (\widetilde{I}_{as} + \widetilde{I}'_{ar}) \quad (60)$$

$$\frac{\widetilde{V}'_{ar}}{s} = \left(\frac{r'_r}{s} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot X'_{lr} \right) \cdot \widetilde{I}'_{ar} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot X_m (\widetilde{I}_{as} + \widetilde{I}'_{ar}) \quad (61)$$

Onde s é o *slip* e pode ser dado por:

$$s = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} \quad (62)$$

As equações anteriores sugerem o circuito equivalente representado na Figura 36.

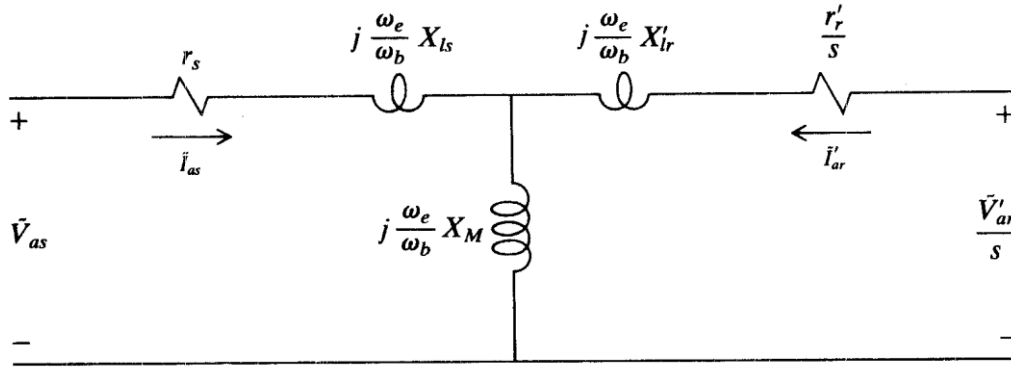


Figura 36 - Circuito equivalente do DFIG em steady state [32].

Como se viu anteriormente, o ω_b corresponde à frequência nominal usada para calcular as reactâncias por unidade. Apesar da relação de ω_e com ω_b não ser usualmente incluída nos modelos *steady state*, esta relação torna possível a aplicação das equações de tensões para qualquer sistema de frequência. De notar que a razão ω_e com ω_b a multiplicar com a reactância pode ser substituída por ω_e a multiplicar pela respetiva indutância, assim fica:

$$\widetilde{V}_{as} = (r_s + j\omega_e \cdot L_{ls}) \cdot \widetilde{I}_{as} + j\omega_e \cdot M(\widetilde{I}_{as} + \widetilde{I}'_{ar}) \quad (63)$$

$$\frac{\widetilde{V}'_{ar}}{s} = \left(\frac{r'_r}{s} + j\omega_e \cdot L'_{lr} \right) \cdot \widetilde{I}'_{ar} + j\omega_e \cdot M(\widetilde{I}_{as} + \widetilde{I}'_{ar}) \quad (64)$$

O binário eletromagnético produzido pode ser dado por:

$$T_e = 3 \cdot p \cdot \left(\frac{X_m}{\omega_b} \right) \text{Re} [j \widetilde{I}'_{as} \cdot \widetilde{I}'_{ar}] \quad (65)$$

Modelo do gerador indutivo de gaiola de esquilo em estado estacionário

Os geradores assíncronos de gaiola de esquilo são excitados individualmente pela potência transferida dos enrolamentos do estator para os enrolamentos do rotor que estão em curto-circuito. A maioria das máquinas excitadas individualmente tem o rotor em gaiola de esquilo. Como os enrolamentos do rotor estão em curto-circuito a tensão \widetilde{V}'_{ar} é igual a zero. Desta forma no esquema equivalente do gerador assíncrono em *steady state* pode-se determinar a impedância equivalente uma vez que $\widetilde{V}'_{ar} = \mathbf{0}$ obtêm-se [32]:

$$Z = \frac{\frac{r_s \cdot r'_r}{s} + \left(\frac{\omega_e}{\omega_b} \right)^2 \cdot (X_m^2 - X_{ss} \cdot X'_{rr}) + j \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot \left(\frac{r'_r}{s} \cdot X_{ss} + r_s \cdot X'_{rr} \right)}{\frac{r'_r}{s} + j \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot X'_{rr}} \quad (66)$$

Sabe-se que:

$$|\widetilde{I}_{as}| = \frac{|\widetilde{V}_{as}|}{|Z|} \quad (67)$$

De acordo com [32] o binário eletromagnético do gerador assíncrono de gaiola de esquilo é dado por:

$$T_e = \frac{3 \cdot p \cdot \frac{\omega_e}{\omega_b} \cdot \left(\frac{X_m^2}{\omega_b}\right) \cdot r_r' \cdot s \cdot |\widetilde{V}_{as}|^2}{\left[r_s \cdot r_r' + s \cdot \left(\frac{\omega_e}{\omega_b}\right)^2 \cdot (X_m^2 - X_{ss} \cdot X_{rr}')\right]^2 + \left(\frac{\omega_e}{\omega_b}\right)^2 \cdot (r_r' \cdot X_{ss} + s \cdot r_s \cdot X_{rr}')^2} \quad (68)$$

2.1.3.2 Gerador Síncrono

Gerador síncrono, modelo $dq0$

Um gerador síncrono é uma máquina elétrica onde a velocidade de rotação do rotor é síncrona com a velocidade de rotação elétrica. A frequência da energia elétrica, produzida pelo gerador, depende do número de pólos e da velocidade de rotação do mesmo.

No modelo do gerador síncrono são incluídos os enrolamentos amortecedores do rotor também conhecidos como *dampers*. As tensões V_Q e V_D são as tensões nos enrolamentos *dampers*, e assumem um valor nulo porque estes estão em curto-circuito.

Aplicando a transformada de *Park* pode converter-se o sistema de coordenadas *abc* para o sistema de coordenadas $dq0$, projetando-se assim as quantidades do estator no sistema de coordenadas $dq0$. No caso do rotor, os *dampers* já estão no sistema de coordenadas dq não sendo necessário realizar qualquer ação relativamente a estes. Com esta transformação as equações das tensões do gerador síncrono são dadas por [34]:

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (69)$$

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (70)$$

$$V_{0s} = r_s \cdot i_{0s} + \frac{d\lambda_{0s}}{dt} \quad (71)$$

$$0 = r_D \cdot i_D + \frac{d\lambda_D}{dt} \quad (72)$$

$$0 = r_Q \cdot i_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt} \quad (73)$$

$$V_f = r_f \cdot i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (74)$$

Onde os fluxos magnéticos são obtidos com:

$$\lambda_{ds} = L_{ls} \cdot i_{ds} + L_{md} \cdot (i_{ds} + i_f + i_D) \quad (75)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} \cdot i_{qs} + L_{mq} \cdot (i_{qs} + i_Q) \quad (76)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} \cdot i_{0s} \quad (77)$$

$$\lambda_D = L_{lD} \cdot i_D + L_{md} \cdot (i_D + i_f + i_{ds}) \quad (78)$$

$$\lambda_Q = L_{lQ} \cdot i_Q + L_{mq} \cdot (i_Q + i_{qs}) \quad (79)$$

$$\lambda_f = L_{lf} \cdot i_f + L_{md} \cdot (i_f + i_D + i_{ds}) \quad (80)$$

Onde:

$V_{(dq0)s}$ – Tensão fase correspondente do estator (V);

r_s – Resistência dos enrolamentos do estator (Ω);

r_f – Resistência do enrolamento do campo de excitação (Ω);

r_Q e r_D – Resistências dos enrolamentos dos *dampers* em quadratura e directo (Ω);

λ_Q e λ_D – Fluxos totais dos *dampers* em quadratura e directo (Wb);

V_f – Tensão do campo de excitação (V);

i – Corrente do campo de excitação (A);

i_Q e i_D – Correntes dos *dampers* em quadratura e directo (A);

L_{lD} e L_{lQ} – Indutância de fuga dos *dampers* d e q respectivamente (H);

L_{lf} – Indutância de fuga do campo de excitação (H);

L_{ls} – Indutância de fuga do estator (H);

L_{md} – Indutância mútua nos eixos d (H);

L_{mq} – Indutância mútua nos eixos q (H);

Reescrevendo o sistema de equações na forma matricial obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{0s} \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda_f \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda_f \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (81)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ \lambda_{qs} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda_f \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_{ls} + L_{md}) & 0 & 0 & L_{md} & L_{md} & 0 \\ 0 & (L_{ls} + L_{mq}) & 0 & 0 & 0 & L_{mq} \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_{md} & 0 & 0 & (L_{lf} + L_{md}) & L_{md} & 0 \\ L_{md} & 0 & 0 & L_{md} & (L_{ld} + L_{md}) & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & 0 & 0 & (L_{lq} + L_{mq}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (82)$$

Que na forma condensada fica de acordo com (53) e (54).

O binário eletromecânico do gerador síncrono pode ser obtido através de [35]:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (83)$$

2.1.3.3 Gerador Síncrono de magnetos permanentes

Gerador síncrono de magnetos permanentes com indutâncias próprias diferentes

Como falado anteriormente os geradores síncronos de magnetos permanentes são largamente utilizados nos aerogeradores de velocidade variável porque apresentam um largo regime de rotações de operação, eficiência elevada e manutenção baixa devido a não existirem enrolamentos no rotor [36]:

Nos geradores síncronos de magnetos permanentes não existe um circuito de excitação, este é substituído por magnetos, deixa de existir assim campos referentes às correntes no rotor. Desta forma segundo [36] o gerador síncrono de magnetos permanentes pode ser expresso nos eixos de referencia de rotação de *Park*, onde as equações das tensões podem ser expressas com:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e \\ \omega_e & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} \quad (84)$$

Onde os fluxos magnéticos são dados por:

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M \\ M & L_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_f \cos \theta_r \\ \lambda_f \sin \theta_r \end{bmatrix} \quad (85)$$

Onde:

L_d e L_q – Indutâncias próprias direta e de quadratura do estator (H);

M – Indução mútua entre o eixo d e q do estator (H);

V_d e V_q - Tensões direta e de quadratura do estator (V);

λ_f – Fluxo do magneto permanente (Wb);

Neste caso o binário eletromagnético é dado por:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_f + (L_d - L_q) i_d) i_q \quad (86)$$

Estas equações podem ser rearranjadas com o propósito de evidenciar as derivadas das correntes, ficando:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} \\ \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r_s & \omega_e L_q \\ -\omega_e L_d & -r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_e \lambda_f \end{bmatrix} \quad (87)$$

Colocando as correntes como variáveis de estado, as equações de estado adquirem a forma:

$$[X] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad [U] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \lambda_f \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} \frac{-r_s}{L_d} & \frac{\omega_e L_q}{L_d} \\ \frac{-\omega_e L_d}{L_q} & \frac{-r_s}{L_q} \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & \frac{-\omega_e}{L_q} \end{bmatrix} \quad (88)$$

Para:

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (89)$$

Gerador síncrono de magnetos permanentes com indutâncias próprias iguais

Considerando as indutâncias próprias L_d e L_q iguais e substituindo estas por L_s , passa a existir uma única indutância própria no estator [37].

Como no caso anterior, considera-se que as resistências dos enrolamentos são iguais, após estas simplificações das indutâncias próprias obtêm-se as seguintes equações:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r_s & \omega_e L_s \\ -\omega_e L_s & -r_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_e \lambda_f \end{bmatrix} \quad (90)$$

Colocando as correntes como variáveis de estado, de acordo com (89), as equações de estado adquirem forma:

$$[X] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad [U] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \lambda_f \end{bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} \frac{-r_s}{L_s} & \omega_e \\ -\omega_e & \frac{-r_s}{L_s} \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & \frac{-\omega_e}{L_s} \end{bmatrix} \quad (91)$$

Feitas estas simplificações o binário eletromagnético é dado pela expressão:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_f i_q) \quad (92)$$

2.2 Modelação de painéis fotovoltaicos

A representação dos painéis fotovoltaicos pode ser feita recorrendo a esquemas de circuitos eléctricos, tornando-se numa ferramenta útil para o estudo do seu comportamento em diferentes condições. A modelação de painéis fotovoltaicos pode ser feita recorrendo a dois tipos de modelos, os modelos de um-díodo e os modelos de dois-díodos.

Tipicamente uma célula fotovoltaica gera uma tensão entre **0,5 – 0,8** volts dependendo da tecnologia utilizada, esta tensão é baixa e não pode ser utilizada diretamente. Para tornar viável esta tecnologia dezenas de células fotovoltaicas são ligadas em série num módulo fotovoltaico. O painel fotovoltaico por sua vez é constituído por um conjunto de módulos ligados em série e em paralelo.

2.2.1 Modelo um-díodo

Modelo ideal de um-díodo

O modelo ideal de um-díodo não tem em conta qualquer tipo de perdas internas devido à corrente, sendo constituído unicamente pela célula fotovoltaica e pelo díodo. Na Figura 37 mostra-se o esquema representativo do modelo ideal de um-díodo para um módulo com N_s (numero de células fotovoltaicas) células ligadas em série [38].

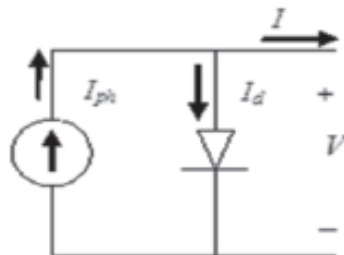


Figura 37 – Esquema representativo do modelo ideal de um -díodo [38].

Aplicando a lei das malhas, à corrente na saída do módulo, obtêm-se:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (93)$$

I_{ph} – Corrente gerada pela célula fotovoltaica (A);

I_d – Corrente de fuga no díodo (A);

A corrente de fuga do díodo, para o modelo ideal, pode ser obtida com:

$$I_d = I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V}{a \cdot V_T}\right)} - 1 \right] \quad (94)$$

Onde:

I_0 – Corrente reversa de saturação (A);

a – Fator de idealidade do díodo;

V – Tensão imposta ao díodo (V);

V_T – Tensão térmica, que depende exclusivamente da temperatura e é calculada com a seguinte fórmula:

$$V_T = \frac{k \cdot T_c \cdot N_s}{q} \quad (95)$$

k – Constante de Boltzman = 1.38×10^{-23} (J/K);

q – Carga elétrica = 1.60×10^{-19} (C);

T_c – Temperatura da célula (K);

N_s – Numero de células ligadas em série no módulo;

Na Tabela 1 mostra-se os valores típicos dos fatores de idealidade a dos díodos para diferentes tecnologias de células fotovoltaicas.

Tabela 1 - Fator de idealidade, adaptado de [38].

Tecnologia	Fator de idealidade - a
Si-mono	1,2
Si-poly	1,3
a-Si-H	1,8
a-Si-H tandem	3,3
a-Si-H triple	5
cdTe	1,5
CTs	1,5
AsGa	1,3

Modelo de um-díodo com resistência em série

Na realidade, é impossível ignorar as perdas provocadas pela passagem da corrente nas resistências internas do módulo. Assim torna-se imprescindível a associação de uma resistência interna no módulo. Esta resistência interna será ligada em série permitindo simular as perdas internas do módulo de forma a obter uma maior exatidão nos resultados. A Figura 38 mostra o esquema representativo do modelo de um-díodo com resistência em série.

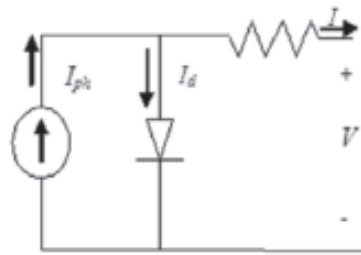


Figura 38 - Esquema representativo do modelo de um-díodo com resistência em série [38].

A corrente de saída do módulo com uma resistência em série pode ser obtida com:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (96)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{a \cdot V_T} \right)} - 1 \right] \quad (97)$$

Onde:

R_s – Resistência em série (Ω);

Modelo de um-díodo com resistência em série e em paralelo

O modelo anterior, de um díodo com uma resistência em série, aproxima-se da realidade. No entanto, se for incluída uma resistência em paralelo, aumenta-se a exatidão da simulação das perdas internas. Na Figura 39 mostra-se o esquema representativo do modelo de um díodo com resistência em série e em paralelo.

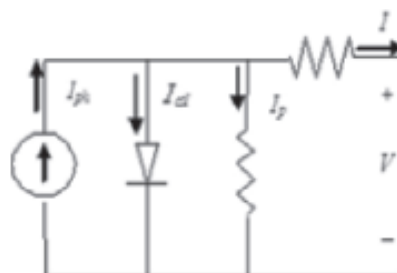


Figura 39 - Esquema representativo do modelo de um-díodo com resistência em série e em paralelo [38].

A corrente de saída do modelo pode ser obtida com o seguinte conjunto de equações:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (98)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{a \cdot V_T} \right)} - 1 \right] \quad (99)$$

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (100)$$

Onde:

R_p – Resistência em paralelo (Ω);

I_p – Corrente de fuga pela resistência em paralelo (A);

Combinando as equações anteriores obtém-se a seguinte expressão para a corrente de saída do módulo com resistência em série e em paralelo.

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s}{a \cdot V_T} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (101)$$

Comparação dos três modelos

Segundo [39], comparando os três modelos estudados, revela-se que o modelo de um-díodo com resistência em serie oferece um resultado semelhante ao comportamento realista de um módulo fotovoltaico combinando a simplicidade com a precisão.

Modelo de um-díodo para um painel com matriz $N_{ss} \times N_{pp}$

Como foi visto anteriormente, um painel fotovoltaico é constituído por um conjunto de módulos ligados em série e em paralelo ente si. Considera-se, assim, que existem N_{ss} módulos ligados em série e N_{pp} módulos ligados em paralelo. A corrente de saída do painel fotovoltaico com matriz $N_{ss} \times N_{pp}$ é obtida com a seguinte expressão [40]:

$$I = I_{ph} \cdot N_{pp} - I_0 \cdot N_{pp} \cdot \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{a \cdot V_T \cdot N_{ss}} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{R_p \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (102)$$

Onde:

N_{ss} – Numero de módulos ligados em série;

N_{pp} – Numero de módulos ligados em paralelo;

De notar que este modelo do painel fotovoltaico já tem em consideração a resistência em série e em paralelo do painel.

2.2.2 Modelo de dois-díodos

Modelo de dois-díodos com resistência em serie e em paralelo

O modelo de dois-díodos tem em conta a existência de dois díodos, aumentando-se assim a precisão da corrente de saturação perdida devida o aumento da tensão. O circuito equivalente é constituído por dois díodos ligados em paralelo. Na Figura 40, mostra-se um esquema representativo do módulo de dois díodos com resistência em série e em paralelo [40].

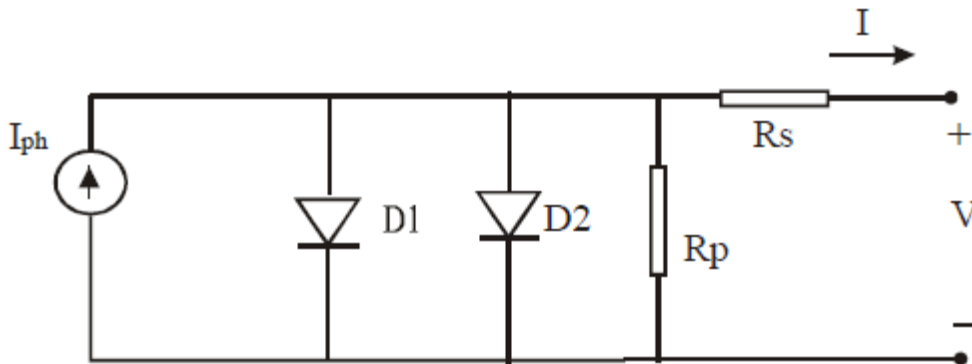


Figura 40 - Esquema representativo do módulo de dois-díodos com resistência em série e em paralelo [40].

A corrente de saída do módulo pode ser obtida com:

$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left[e^{\left(\frac{V+I.R_s}{a_1.V_{T1}} \right)} - 1 \right] - I_{02} \cdot \left[e^{\left(\frac{V+I.R_s}{a_2.V_{T1}} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (103)$$

Onde:

$$I_0 = I_{01} = I_{02} \quad (104)$$

$$V_T = V_{T1} = V_{T2} \quad (105)$$

a_1 – Fator de idealidade do díodo 1;

a_2 – Fator de idealidade do díodo 2;

Modelo de dois-díodos para um painel com matriz $N_{ss} \times N_{pp}$

A corrente de saída do painel fotovoltaico com uma matriz $N_{ss} \times N_{pp}$ aplicando o modelo de dois-díodos pode ser obtida com [40]:

$$I = I_{ph} \cdot N_{pp} - I_{01} \cdot N_{pp} \cdot \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{a_1 \cdot V_{T1} \cdot N_{ss}} \right)} - 1 \right] - I_{02} \cdot N_{pp} \cdot \left[e^{\left(\frac{V + I \cdot R_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{a_2 \cdot V_{T1} \cdot N_{ss}} \right)} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{R_p \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (106)$$

2.2.3 Cálculo de parâmetros

Cálculo do parâmetro I_{ph}

A corrente fotoelétrica gerada pela célula é dada por [40]:

$$I_{ph} = (I_{ph,STC} + k_i \cdot \Delta T) \frac{G}{G_{STC}} \quad (107)$$

Onde:

$$\Delta T = T_c - T_{ref} \quad (108)$$

$I_{ph,STC}$ – Corrente fotoelétrica gerada nas condições de referência, é igual a $I_{SC,STC}$ (A);

G_{STC} – Radiação solar nas condições de referência (W/m^2);

T_{ref} – Temperatura da célula nas condições de referência (K);

k_i – Coeficiente de corrente de curto-circuito em relação à temperatura (A/K);

Cálculo do parâmetro I_0

A corrente reversa de saturação I_0 pode ser obtida de duas formas:

i)

Segundo [40], o I_0 pode ser obtido utilizando (109):

$$I_0 = \frac{I_{sc,STC} + k_i \cdot \Delta T}{\left(e^{\left(\frac{V_{oc,STC} + k_v \cdot \Delta T}{a \cdot V_T} \right)} - 1 \right)} \quad (109)$$

Onde:

k_v – Coeficiente de tensão de circuito-aberto em relação à temperatura (V/K);

$I_{sc,STC}$ – Corrente de curto-circuito nas condições de referência (A);

$V_{oc,STC}$ – Tensão de circuito-aberto nas condições de referência (V);

ii)

Segundo [21], o I_0 pode ser obtido com:

$$I_0 = \frac{I_{sc} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\left(q \cdot eg \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right)}{\left(e^{\left(\frac{V_{oc}}{a \cdot V_T} \right)} - 1 \right)} \quad (110)$$

Onde eg é a gap de energia ou banda proibida do material (*band gap of material*) (eV).

Fator de sujidade

O fator de sujidade (SF), ou *soiling factor*, tem em conta a sujidade existente no painel fotovoltaico. Para painéis totalmente limpos assume-se o valor de **1,0** e tipicamente não é inferior a **0,95** caso não seja visível sujidade no painel [41].

Associando este fator à radiação solar incidente pode prever-se a radiação perdida devido à sujidade. Para tal usa-se a seguinte equação:

$$G = SF \cdot G_{measured} \quad (111)$$

2.2.4 Modelos de temperatura

No caso real, o painel fotovoltaico não opera a temperaturas constantes. A temperatura varia dependendo de uma enorme variedade de variáveis, tais como a temperatura ambiente, a radiação solar, o vento, o método de arrefecimento, entre outros.

Obviamente que esta variação da temperatura no painel vai influenciar a eficiência do mesmo, sendo assim importante estudar a evolução da temporal da temperatura no painel fotovoltaico para diferentes condições.

Modelo termodinâmico com coeficientes obtidos com regressão linear

Na realidade, existe sempre alguma incerteza associada aos valores termodinâmicos simulados e aos que são medidos na realidade. Em [41] propõe-se uma aproximação que utiliza coeficientes empiricamente determinados. Segundo [41], esta aproximação é boa o suficiente para desenvolver o estudo de sistemas fotovoltaicos.

De acordo com [41], a temperatura esperada na célula tem uma aproximação de mais ou menos **5 %**. Com esta variação de incerteza da temperatura, pode-se esperar uma variação na potência final inferior a **3 %**.

Para utilizar este modelo o mais próximo possível da realidade é necessário determinar os coeficientes a e b usados no modelo. Nesta determinação, é necessário realizar milhares de medições das temperaturas, incidência de radiação e vento, em diferentes dias do ano, com o modelo a funcionar perto do equilíbrio térmico (dias limpos sem variação da temperatura devido às nuvens).

Após a recolha de todas as medições, os coeficientes a e b podem ser estimados usando a regressão linear que corresponda a:

$$\ln\left(\frac{T_m - T_a}{G}\right) = a + b.V_w \quad (112)$$

Na Figura 41 mostra-se um exemplo desse conjunto de valores:

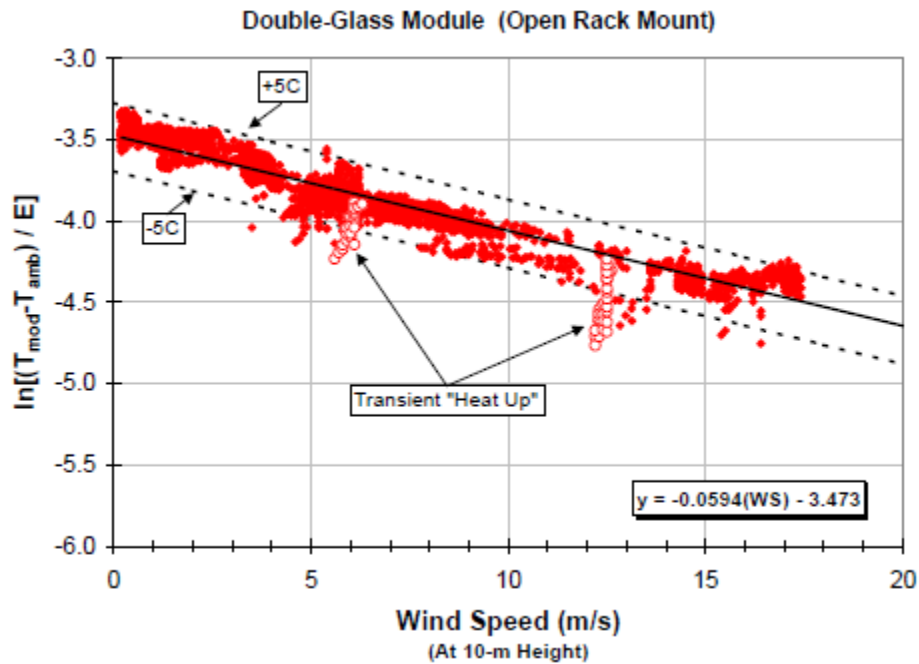


Figura 41 - Exemplo de medições obtidas para determinar os coeficientes a e b [41].

Salienta-se que os valores a e b devem ser determinado para cada caso, no entanto em [41] encontra-se um conjunto desses valores que foram empiricamente determinados, para algumas situações comuns. Na Tabela 2 são mostrados esses valores.

Tabela 2 - Exemplo de coeficientes a e b empiricamente determinados, adaptado [41].

Tipo de módulo	Montagem	a	b	ΔT (°C)
Glass/Cell/Glass	Open Rack	-3,47	-0,0594	3
Glass/Cell/Glass	Close Roof Mount	-2,98	-0,0471	1
Glass/Cell/Polymer Sheet	Open Rack	-3,56	-0,0750	3
Glass/Cell/Polymer Sheet	Insulated Back	-2,81	-0,0455	0
Polymer/Thin Film/Steel	Open Rack	-3,58	-0,113	3
22X Linear Concentrator	Tracker	-3,23	-0,130	13

Para compreender a classificação do tipo de módulo e do tipo de montagem procede-se a uma descrição detalhada de cada tipo:

Glass/Cell/Glass - Open Rack → As células solares são montadas entre a parte frontal de vidro e a traseira de vidro. O módulo é montado numa armação aberta permitindo que o ar circule livremente ao redor do módulo.

Glass/Cell/Glass - Close Roof Mount → As células solares são montadas entre uma frente de vidro e a traseira de vidro. O módulo é montado numa armação com pouca folga entre a superfície da construção e o módulo traseiro, permitindo que pouco ar flua sobre a parte traseira do módulo.

Glass/Cell/Polymer Sheet - Open Rack → As células solares são montadas entre uma frente de vidro e a traseira de polímero. O módulo é montado numa armação aberta, permitindo que o ar circule livremente ao redor do módulo.

Glass/Cell/Polymer Sheet - Insulated Back → As células solares são montadas entre uma frente de vidro e a traseira de polímero. O módulo é montado diretamente numa superfície de construção, numa aplicação de painel integrada que evita que o ar flua sobre a parte traseira do módulo.

Polymer/Thin Film/Steel - Open Rack → As células solares são montadas em camadas: à frente, uma de polímero transparente; e outra na traseira de aço. O módulo é montado numa armação aberta permitindo que o ar circule livremente ao redor do módulo.

Após a determinação dos coeficientes a e b , consegue-se calcular a temperatura da célula com as seguintes expressões [41]:

$$T_c = T_m + \frac{G}{G_0} \Delta T \quad (113)$$

$$T_m = G \cdot e^{(a+b \cdot V_w)} + T_a \quad (114)$$

Onde:

a – Coeficiente empírico que determina a temperatura máxima limite com pouco vento;

b – Coeficiente empírico que estabelece a relação entre a descida de temperatura e o aumento da velocidade do vento;

G_0 - Radiação solar de referência **1000 (W/m²)**;

T_c - Temperatura da célula (°C);

T_a - Temperatura do ambiente (°C);

T_m - Temperatura da superfície preta do painel (°C);

V_w - Velocidade do vento (m/s);

ΔT - Diferença de temperatura entre a célula e a superfície preta do módulo à radiação de **1000 W/m²**. Tipicamente este valor é **2 °C** a **3 °C** para módulos planos, montados em armações abertas que permitam a circulação de ar. Para módulos planos com isolamento térmico na superfície inferior, este valor pode ser assumido como zero.

2.2.5 MPPT – Solar

Como foi visto anteriormente, a produção de energia elétrica de um painel fotovoltaico depende de várias variáveis externas ao sistema, tais como a radiação solar e a temperatura. No entanto, a potência extraída também depende do regime de funcionamento do painel, nomeadamente da corrente da carga imposta.

Para maximizar a eficiência do painel fotovoltaico, são implementados sistemas de controlo de potência máxima, também conhecido por *Maximum power point tracking* (*MPPT*), que procuram o ponto de operação de maior eficiência da conversão da energia do painel fotovoltaico para maximizar a produção. A partir deste ponto, para efeitos de simplificação, estes controladores de potência máxima serão referidos apenas como *MPPT*.

Várias técnicas de *MPPTs* foram desenvolvidas ao longo dos últimos anos, passa-se agora a citar as que irão ser utilizadas neste projeto.

2.2.5.1 *MPPT* - $\partial P/\partial V$

Este algoritmo de *MPPT* utiliza a relação $\frac{\partial P}{\partial V}$ para procurar corrigir a tensão de saída para um ponto mais eficiente.

Assim, segundo [42]:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{MPP} = \left[\frac{\partial(V \cdot I)}{\partial V}\right]_{MPP} = I_{MPP} + V_{MPP} \cdot \left(\frac{\partial I}{\partial V}\right)_{MPP} = 0 \quad (115)$$

Quando $\frac{\partial P}{\partial V} = 0$, o painel fotovoltaico está no ponto *MPP* (ponto de produção máxima). Pode-se, assim, construir o seguinte algoritmo, representado na Figura 42, para o *MPPT* [42].

O algoritmo está constantemente a observar as leituras de potência e de tensão, ajustando o funcionamento do painel fotovoltaico em torno do ponto de produção máximo.

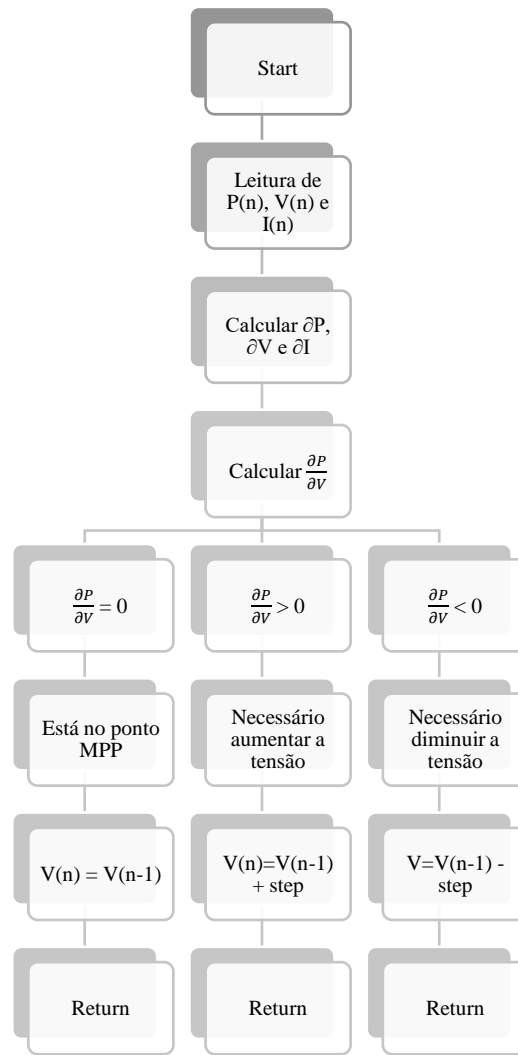


Figura 42 - Algoritmo do MPPT de $\partial P/\partial V$.

2.2.5.2 MPPT – FOV & FSC

O MPPT apresentado de seguida baseia-se na tensão de circuito aberto fracional ou *Fractional Open-Circuit Voltage (FOV)* e na corrente de curto-circuito fracional ou *Fractional Short-Circuit Current (FSC)* [43].

Método FOV

O algoritmo deste MPPT utiliza a relação linear entre a tensão no ponto MPP e a tensão de circuito aberto, esta relação é dada por:

$$V_{MPP} = K_v \cdot V_{OC} \quad (116)$$

Onde:

K_v – Constante de fator de *MPP* que varia entre **0,73** e **0,8** [43];

V_{OC} – Tensão de circuito aberto (V);

De notar que é necessário introduzir no sistema um interruptor estático para medir a tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico.

Método *FSC*

Este algoritmo baseia-se na relação linear entre a corrente no ponto *MPP* e a corrente de curto-circuito. Esta relação é dada por:

$$I_{MPP} = K_I \cdot I_{SC} \quad (117)$$

Onde:

K_I – Constante de fator de *MPP* que varia entre **0,85** e **0,92** [43];

I_{SC} – Corrente de curto-circuito (A);

De notar que é necessário introduzir um interruptor estático em paralelo no painel fotovoltaico para medir a corrente de curto-circuito.

Algoritmos *FOV* & *FSC*

Os algoritmos para os métodos anteriormente citados podem ser implementados usando os fluxogramas mostrados na Figura 43, o da esquerda para o método *FSC* e o da direita para o método *FOV*.

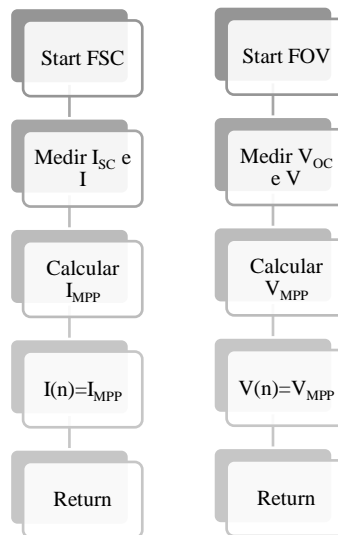


Figura 43 - Algoritmo do MPPT de FSC & FOC.

Como já foi referido anteriormente, este tipo de controlador *MPPT* exige a montagem de um interruptor estático (em série ou em paralelo, dependendo da opção) para calcular o ponto de operação ideal.

2.2.5.3 MPPT – P&O

O método de perturbação e observação, também conhecido por *Perturb & Observe* (*P&O*), utiliza a variação da potência do painel fotovoltaico em função de variações impostas a este na corrente ou na tensão. O algoritmo opera periodicamente, aumentando e diminuindo a tensão imposta no painel fotovoltaico procurando assim o ponto de produção máxima (*MPP*). O aumento/diminuição da tensão é efetuada por passos (*steps*) de variação. É importante notar que os *steps* demasiados grandes provocam perturbações no funcionamento do painel e os demasiados pequenos tornam o *MPPT* lento. Desta forma, é necessário ter alguma sensibilidade para escolher o *step* adequado ao sistema [44].

Segundo [44], o *MPPT P&O* pode ser implementado utilizando o algoritmo representado na Figura 44.

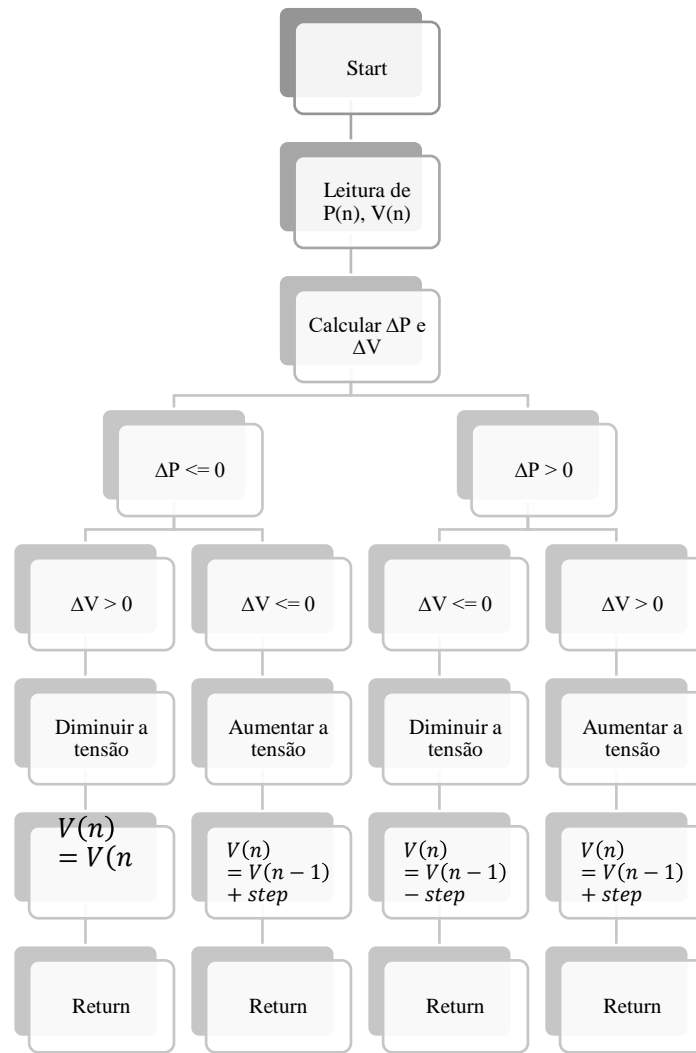


Figura 44 - Algoritmo MPPT de P&O.

Como se observa, este algoritmo irá procurar o ponto de operação máxima provocando perturbações no sistema e observando os resultados. Assim, se uma dada perturbação aumentar a potência de saída, o algoritmo dá o comando para manter a perturbação anterior, caso contrario, isto é, caso a perturbação diminua a potência de saída, o algoritmo dá o comando para contrariar a perturbação anterior.

3. MODELOS SIMULINK

Os modelos construídos para modelar o comportamento dos painéis fotovoltaicos e dos aerogeradores foram divididos em duas bibliotecas: a primeira biblioteca, onde se inclui todos os modelos usados para simular os módulos e os painéis fotovoltaicos como também os sistemas de controlo de potência máxima; a segunda biblioteca contém os modelos para simular os aerogeradores, onde estão incluídos modelos aerodinâmicos das pás, modelos de transformações mecânicas e modelos dos vários geradores.

3.1 Biblioteca de energia solar

A biblioteca de energia solar, é aquela onde estão incluídos os blocos dos modelos para simular os vários componentes/características dos painéis fotovoltaicos, na Figura 45 é mostrado o aspeto da biblioteca de energia solar.

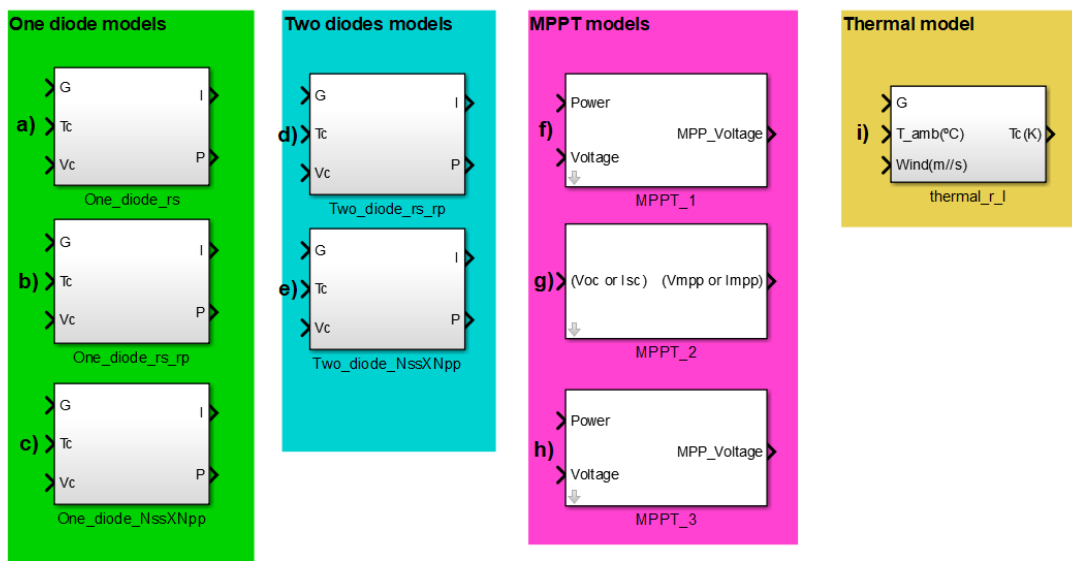


Figura 45 - Aspeto da biblioteca com os modelos solares.

Na Figura 45 de a) a e), são representados os blocos que simulam os módulos e os painéis fotovoltaicos:

- a) - Módulo fotovoltaico utilizando o modelo de um-díodo e com resistência em série no esquema equivalente;
- b) - Módulo fotovoltaico utilizando o modelo de um-díodo e com resistência em série e em paralelo no esquema equivalente;

- c)* - Painel fotovoltaico com uma matriz de N_{ss} módulos ligados em série e N_{pp} módulos ligados em paralelo utilizando o modelo de um-díodo;
- d)* - Módulo fotovoltaico utilizando o modelo de dois-díodos e com resistência em série e em paralelo no esquema equivalente;
- e)* - Painel fotovoltaico com uma matriz de N_{ss} módulos ligados em série e N_{pp} módulos ligados em paralelo utilizando o modelo de dois-díodos;

Na Figura 45 de *f)* a *h)*, são representados os blocos com os modelos de controlo de potência máxima (*MPPT*):

- f)* – *MPPT_1* → Modelo *MPPT* que relaciona a diferença de potência com a diferença de tensão;
- g)* – *MPPT_2* → Modelo *MPPT* que utiliza a corrente de curto-circuito instantânea ou a tensão de circuito aberto instantânea;
- h)* – *MPPT_3* → Modelo *MPPT* baseado no algoritmo de perturbação e observação;

Por último, na Figura 45 *i)* é representado o bloco com o modelo termodinâmico:

- i)* - Modelo termodinâmico da variação da temperatura da célula em função da temperatura ambiente, do vento e da radiação;

Os vários blocos da Figura 45 de *a)* a *e)* que simulam o comportamento dos módulos/painéis fotovoltaicos são constituídos por três entradas: {*G*-radiação solar; *T_c*-temperatura da célula/módulo/painel; e *V_c*-voltage imposta ao módulo/painel}, e duas saídas: {*I*-corrente de saída do módulo/painel; e *P*-potência resultante}. Todos os parâmetros, utilizados para caracterizar os módulos/painéis fotovoltaicos, são introduzidos diretamente nos blocos. Na Figura 46, observa-se o aspeto dos parâmetros a introduzir nos blocos mencionados.

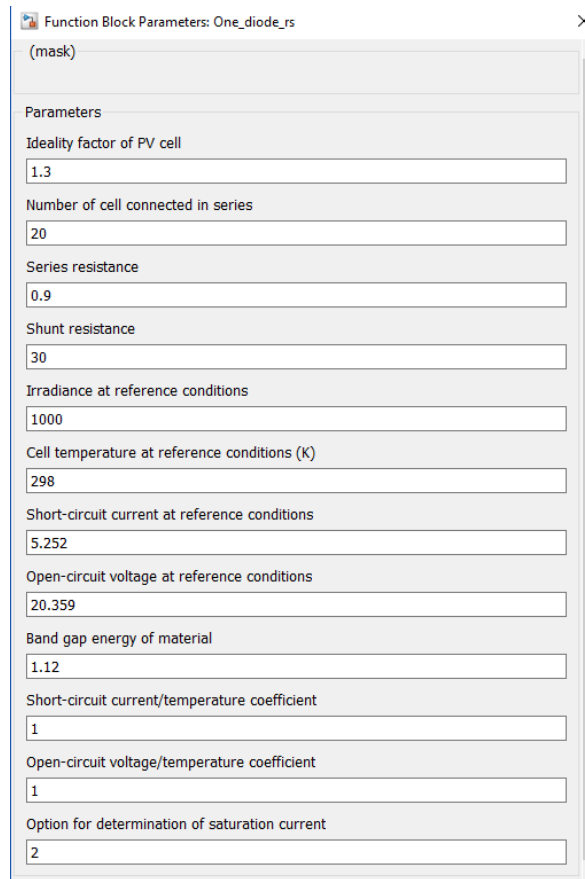


Figura 46 - Parâmetros introduzidos nos blocos dos módulos solares.

Na Figura 45, os blocos *f*) e *h*) simulam os controladores de potência máxima, estes têm duas entradas: {*power*-potência de saída no instante anterior; e *voltage*-tensão de saída no instante anterior}, e uma saída: {*MPP_voltage*-tensão aplicada no ponto de potência máxima}. Na Figura 47, ilustra-se o aspeto dos parâmetros a introduzir em cada um dos blocos mencionados.

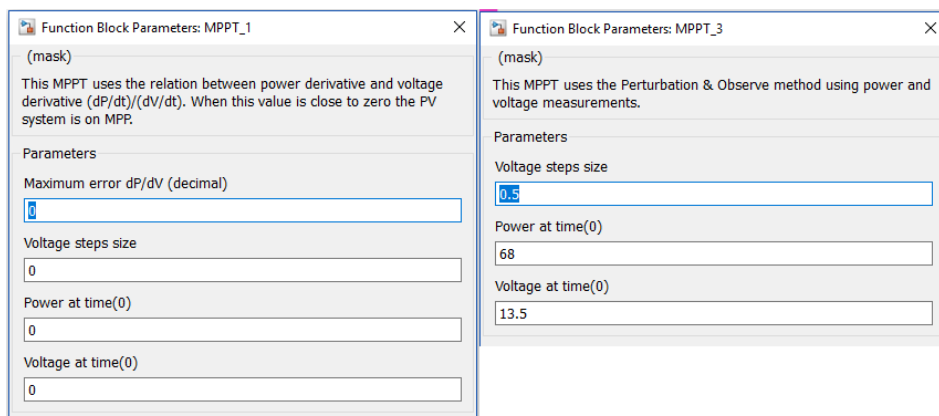


Figura 47- Parâmetros introduzidos nos blocos MPPT.

Na Figura 45 i), é representado o aspeto exterior do modelo termodinâmico de variação da temperatura da célula em função da temperatura ambiente, do vento e da radiação. Este bloco tem três entradas: { G -radiação solar; T_{amb} -temperatura ambiente; e $Wind$ -velocidade do vento}, e uma saída: { T_c -temperatura da célula em graus Kelvin}. Semelhantemente aos outros blocos anteriores, os parâmetros do modelo termodinâmico são introduzidos diretamente no bloco.

3.2 Biblioteca de energia eólica

Na biblioteca de energia eólica, estão incluídos os vários modelos responsáveis para simular o comportamento de um aerogerador, na Figura 48 é mostrado o aspeto exterior da biblioteca de energia eólica.

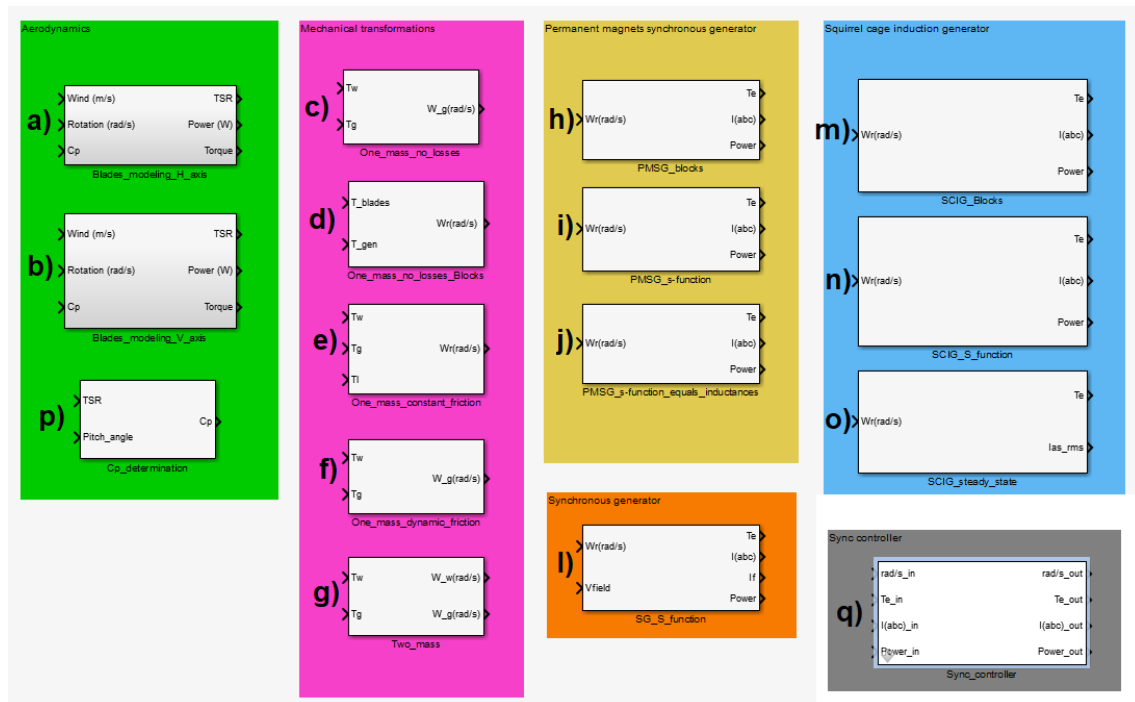


Figura 48 - Aspeto da biblioteca com os modelos eólicos.

Na Figura 48 a) e b), é representado o aspeto exterior dos blocos que simulam o comportamento aerodinâmico das pás:

- a) – Modelo aerodinâmico das pás para aerogeradores de eixo horizontal;
- b) – Modelo aerodinâmico das pás para aerogeradores de eixo vertical;

Na Figura 48 *c) a g)*, é representado o aspeto exterior dos blocos que simulam o comportamento dos componentes mecânicos responsáveis por transformar a energia mecânica:

- c)* – Modelo de uma massa sem perdas mecânicas, utilizando S-Functions;
- d)* – Modelo de uma massa sem perdas mecânicas, utilizando blocos do Simulink;
- e)* – Modelo de uma massa com fricção constante, utilizando S-Functions;
- f)* – Modelo de uma massa com fricção dinâmica, utilizando S-Functions;
- g)* – Modelo de duas massas;

Na Figura 48 *h) a j)*, é representado o aspeto exterior dos blocos que simulam o comportamento dos geradores síncronos de magnetos permanentes:

- h)* – Modelo do gerador síncrono de magnetos permanentes, utilizando os blocos do Simulink;
- i)* – Modelo do gerador síncrono de magnetos permanentes, utilizando as S-Functions;
- j)* – Modelo do gerador síncrono de magnetos permanentes com indutâncias próprias direta e de quadratura iguais;

Na Figura 48 *l)*, é representado o aspeto exterior do bloco que simula o comportamento do gerador síncrono:

- l)* – Modelo do gerador síncrono;

Na Figura 48 *m) a o)*, é representado o aspeto exterior dos blocos que simulam o comportamento do gerador indutivo gaiola de esquilo:

- m)* – Modelo do gerador indutivo gaiola de esquilo, utilizando blocos do Simulink;
- n)* – Modelo do gerador indutivo gaiola de esquilo, utilizando as S-Functions;
- o)* – Modelo do gerador indutivo gaiola de esquilo, em regime de funcionamento permanente e estável;

Finalmente, na Figura 48 *p) e q)*, é representado o aspeto exterior do bloco que determina o valor do C_p e do bloco que controla o sincronismo do gerador;

- p)* – Modelo de cálculo do valor do Coeficiente de potência;
- q)* – Bloco responsável por ligar o gerador à rede/carga;

Os blocos, da Figura 48 de *a)* e *b)*, simulam o comportamento aerodinâmico das pás dos aerogeradores. Os blocos tem três entradas: { *Wind*-velocidade do vento em m/s; *Rotation*-rotação do rotor em rad/s, e C_p - coeficiente de potência}, e três saídas: { *TSR*-razão da velocidade da ponta da pá; *Power*-potência entregue pelas pás; e *Torque*-binário entregue pelas pás}. Os parâmetros para caracterizar o funcionamento das pás são introduzidos diretamente nos blocos: { *Air density*-densidade do ar; e *Blade radius*-raio das pás}.

Os blocos, da Figura 48 *c)*, *d)*, *e)* e *f)*, modelam o comportamento das transformações mecânicas utilizando modelos de uma massa. Estes blocos tem duas/três entradas: { T_w -binário entregue pelas pás; T_g -binário do gerador; e T_l -binário das perdas mecânicas}, e uma saída: { W_r -rotação do rotor em rad/s}. Os parâmetros da simulação são introduzidos diretamente nos blocos. Na Figura 49, ilustra-se um exemplo dos parâmetros a introduzir nos blocos: { *Gearbox ratio*-razão de transformação da caixa de velocidades; *Blades moment inertia*-momento de inércia das pás; *Generator moment of inertia*-momento de inércia do gerador; e *Combined friction coefficient*-coeficiente de fricção combinado}.

The image shows a 'Parameters' window for a block named 'One-mass_dynamic_friction'. It contains four input fields, each with the value '0' entered:

- Gearbox ratio**: 0
- Blades moment of inertia**: 0
- Generator moment of inertia**: 0
- Combined friction coefficient**: 0

Figura 49 - Parâmetros do bloco *One-mass_dynamic_friction*.

O bloco da Figura 48 *g)*, como visto anteriormente, representa o modelo das transformações mecânicas de duas massas. Este diferencia-se exteriormente do modelo de uma massa por ter duas saídas: { W_w -velocidade de rotação do rotor das pás; e W_g -velocidade de rotação do rotor do gerador}.

Os blocos, da Figura 48 *h)*, *i)* e *j)*, representam o gerador síncrono de magnetos permanentes. Estes blocos possuem uma entrada: { W_r -velocidade de rotação do rotor}, e três saídas: { T_e -binário eletromagnético; $I(abc)$ -corrente das três fases; e *Power*-potência entregue pelo gerador}. Como nos outros blocos, os parâmetros destes modelos são

introduzidos diretamente nos blocos. Na Figura 50 observa-se um exemplo dos parâmetros a introduzir nos blocos mencionados.

Parameter	Value
Stator Resistance	0.18
Stator inductance of component d	0.000835
Stator inductance of component q	0.000835
Flux of the permanent magnet	0.07147
Number of pole pairs	4
Voltage	283
Frequency	50

Figura 50 - Parâmetros a introduzir no bloco PMSG_s-function.

Na Figura 48 i), representa-se o bloco do gerador síncrono. Este bloco possui duas entradas: { W_r -velocidade de rotação do rotor; e V_{field} - tensão do campo de excitação}, e quatro saídas: { T_e -binário eletromagnético; $I(abc)$ -corrente das três fases; I_f -corrente do campo de excitação; e $Power$ -potência entregue pelo gerador}. Na Figura 51, observa-se a lista de parâmetros a introduzir no bloco para configurar o seu funcionamento.

Os blocos da Figura 48 m), n), e o), são responsáveis pela simulação do gerador assíncrono de gaiola de esquilo. Estes possuem uma entrada: { W_r -velocidade de rotação do rotor}, e três saídas: { T_e -binário eletromagnético; $I(abc)$ -corrente das três fases; e $Power$ -potência entregue pelo gerador}. De modo semelhante ao dos outros blocos, os parâmetros para a configuração da simulação são introduzidos diretamente no bloco.

O bloco da Figura 48 p), é utilizado para determinar o valor de C_p , quando não existe a curva de potência do aerogerador. Este bloco tem duas entradas: { TSR -razão da velocidade da ponta da pá; e $pitch\ angle$ -ângulo de $pitch$ }, e uma saída { C_p -coeficiente de potência}. Os coeficientes para parametrizar a curva C_p são introduzidos diretamente no bloco.

Parameters	
Stator Resistance	0.0738
Excitation field resistance	0.434
D damper resistance	2.916
Q damper resistance	2.916
Leakage inductance of stator	0.00076
Leakage inductance of excitation field	0.0075
Leakage inductance of d damper	0.0011
Leakage inductance of q damper	0.0011
Mutual inductance d axis	0.01686
Mutual inductance q axis	0.01447
Number of pole pairs	4
Voltage	230
Frequency	50

Figura 51 - Parâmetros do bloco SG_s-function.

O bloco da Figura 48 q), é utilizado para ligar gerador à rede elétrica na velocidade de rotação de sincronismo, evitando assim que o gerador se ligue à rede elétrica em velocidades de rotação fora de sincronismo. Este bloco tem um único parâmetro: {Minimum generator start-up rotation (rad/s)- rotação mínima necessária para conectar o gerador}.

4. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Como existem vários modelos aqui representados, e como seria pouco prático simular todas as diferentes combinações dos modelos, vai-se combinar algumas simulações de forma a validar os modelos.

4.1 Biblioteca da energia solar

Simulação dos painéis fotovoltaicos

Com o objetivo de simplificar e de economia de tempo, os vários modelos dos painéis e módulos fotovoltaicos foram agrupados num ambiente Simulink e parametrizados nas mesmas condições do documento [40] (consultar anexos), combinando-se assim os resultados obtidos e comparando com os resultados expectáveis.

Na Figura 52 está ilustrado o gráfico I-V resultante das várias simulações.

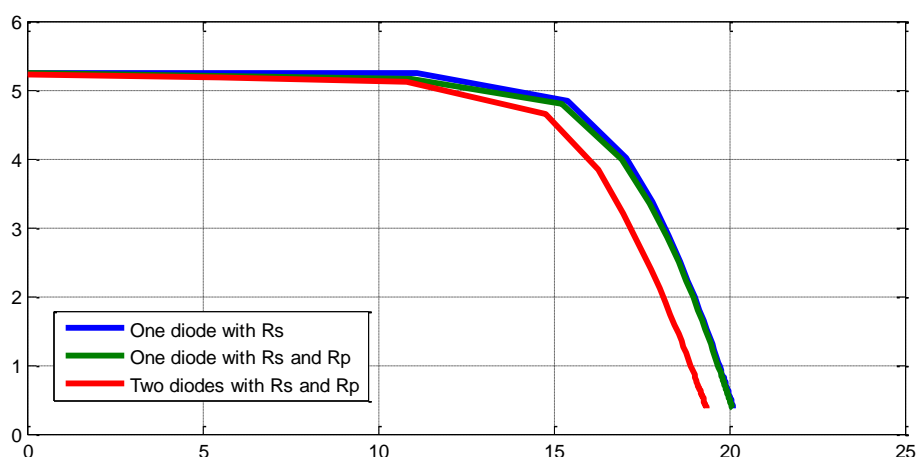


Figura 52 - Curva de I-V dos diferentes módulos, nas condições STC (1000W/m^2 , 25°C).

De forma a comparar os resultados obtidos com os resultados esperados, está ilustrado, na Figura 53, a curva I-V extraída do documento [40] que irá servir de referência.

Comparando as duas figuras, conclui-se que existe uma relação verdadeira entre as várias curvas, comportando-se assim os modelos da forma esperada o que valida o seu funcionamento.

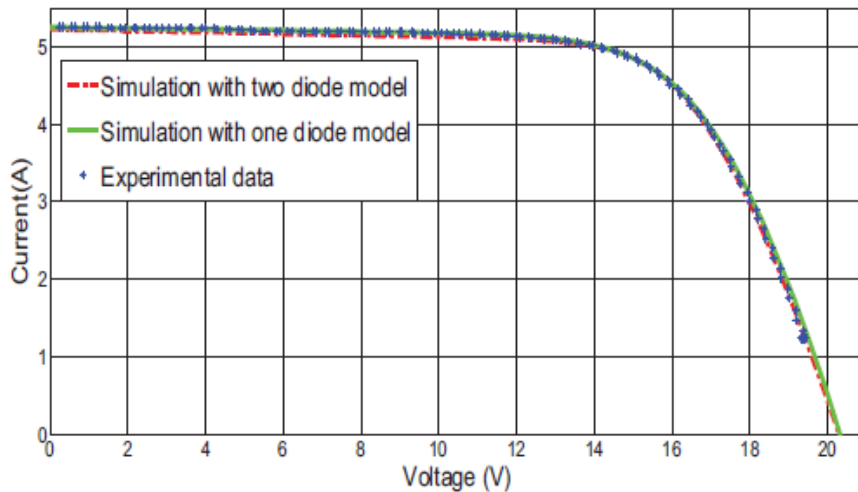


Figura 53 - Curva I-V validada em [40].

Semelhantemente com as curvas I-V, também foram geradas as curvas P-V nas simulações e comparadas com as do documento [40] mostrando assim a sua validação. Na Figura 54, estão ilustradas as curvas P-V geradas na simulação.

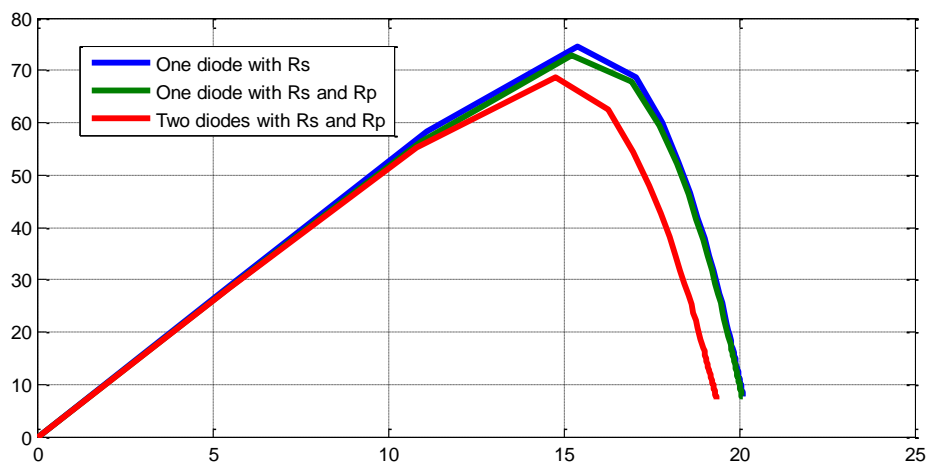


Figura 54 – Curva P-V dos diferentes módulos, nas condições STC ($1000\text{W}/\text{m}^2$, 25°C).

Foi aplicado o mesmo raciocínio na simulação dos painéis fotovoltaicos. Realizou-se simulações utilizando os blocos dos painéis fotovoltaicos com uma matriz de **20** módulos em série e **10** módulos em paralelo. Na Figura 55 e 56, estão ilustradas as curvas I-V e P-V geradas nas simulações.

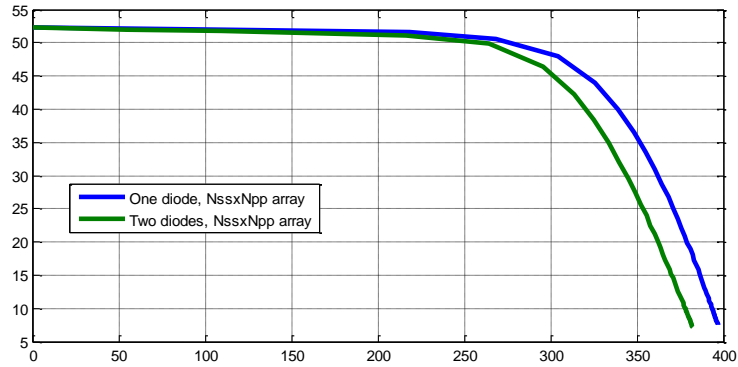


Figura 55 - Curva I-V com matriz de módulos NssxNpp (20x10).

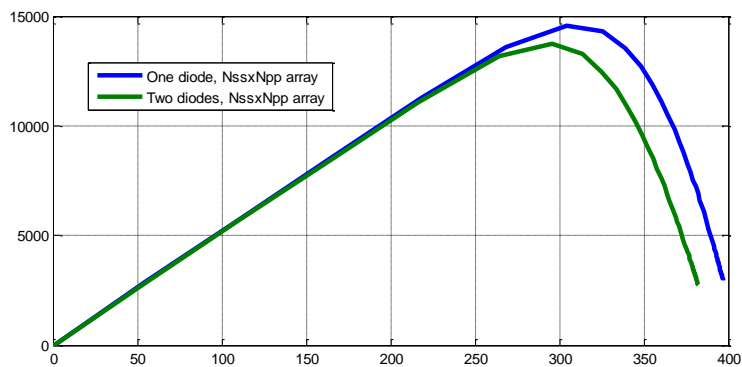


Figura 56 - Curva P-V com matriz de módulos NssxNpp (20x10).

Como se pode observar, o comportamento dos painéis fotovoltaicos corresponde ao esperado, isto é, o aumento de potência está diretamente relacionada com o número de módulos utilizados. As diferentes combinações de módulos em série e em paralelo podem ser utilizada com o objetivo de aumentar a produção de corrente, no caso de módulos em paralelo, ou aumentar a tensão aplicada, no caso de módulos em série.

Como não podia deixar de ser, foi simulado o comportamento do módulo fotovoltaico, para regimes dinâmicos, neste caso foi utilizado um módulo fotovoltaico com resistência em série e em paralelo, para diferentes intensidades de radiação. A intensidade de radiação solar variou nos seguintes passos, **1000 W/m²**, **600 W/m²** e **200 W/m²**. Na Figura 57 e 58, são mostradas as curvas I-V e P-V produzidas nas simulações.

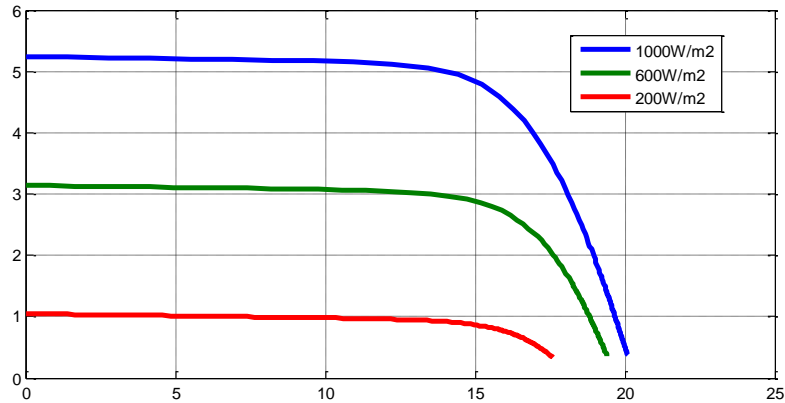


Figura 57 - Curva I-V com variação da radiação.

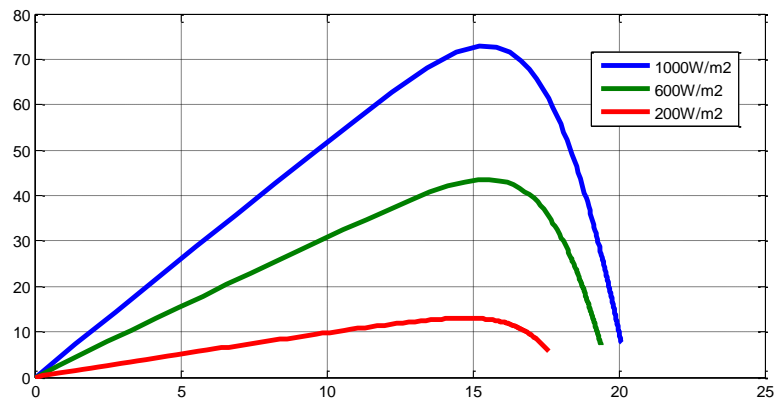


Figura 58 - Curva P-V com variação da radiação.

Como se observa, é facilmente deduzível, que quanto maior a radiação solar, maior é a potência e corrente de saída do módulo fotovoltaico. Prova-se assim, que existe uma relação direta entre a energia produzida no módulo fotovoltaico e a intensidade da radiação solar.

Semelhantemente ao que se fez com a intensidade de radiação solar, foram realizadas simulações do módulo fotovoltaico para diferentes temperaturas, que variaram nos seguintes passos, **0 °C**, **25 °C** e **50 °C**. Nas Figuras 59 e 60, são mostradas as curvas I-V e P-V geradas nessas simulações.

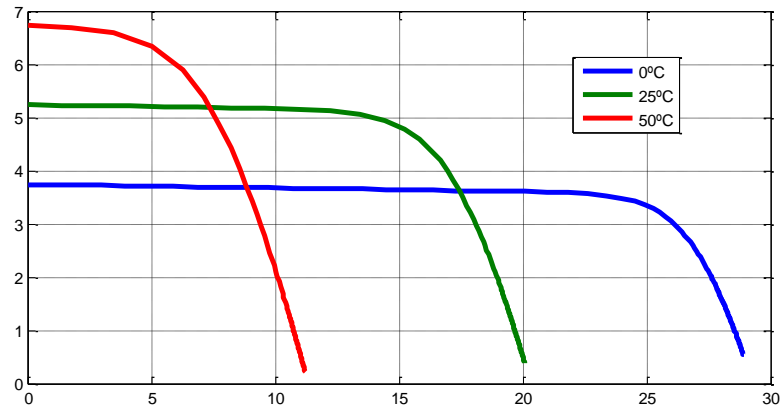


Figura 59 - Curva I-V com variação da temperatura.

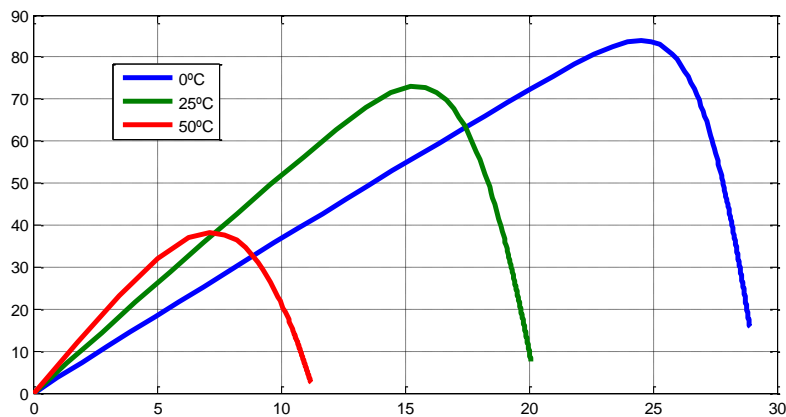


Figura 60 - Curva P-V com variação da temperatura.

Observando as Figuras 59 e 60, conclui-se que a temperatura da célula/módulo influencia o comportamento da célula/módulo fotovoltaico. Isto é, com o aumento da temperatura a intensidade de corrente aumenta. No entanto, esta passa a ser suportada por tensões baixas, em resultado do aumento da intensidade da corrente de fuga do díodo.

Simulação dos controladores MPPT para painéis fotovoltaicos

De forma a testar os controladores de potência máxima, ou MPPT, foi realizado, num ambiente único do Simulink, a simulação dos diferentes controladores para o mesmo módulo especificado com as mesmas condições. Para adicionar alguma variabilidade foi incluída uma intensidade de radiação solar que a variar no tempo. Na Figura 61, é exibido o ambiente Simulink utilizado, e a ligação dos diferentes blocos.

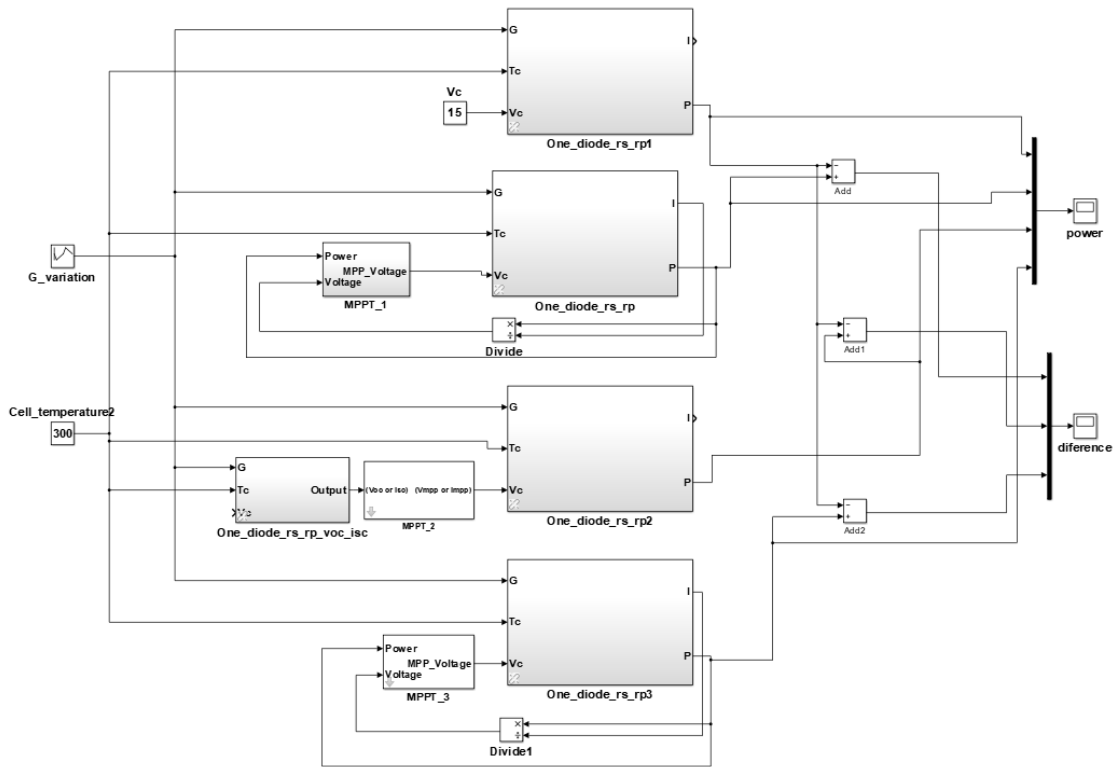


Figura 61 - Ambiente Simulink para validar os modelos de MPPT.

Na Figura 62, são mostrados os resultados extraídos da simulação, onde consta o gráfico da potência máxima à saída do módulo para os diferentes controladores *MPPT*. Foi adicionado um módulo sem *MPPT* e fixado com uma tensão e **15 V** na saída do módulo, para servir de referência.

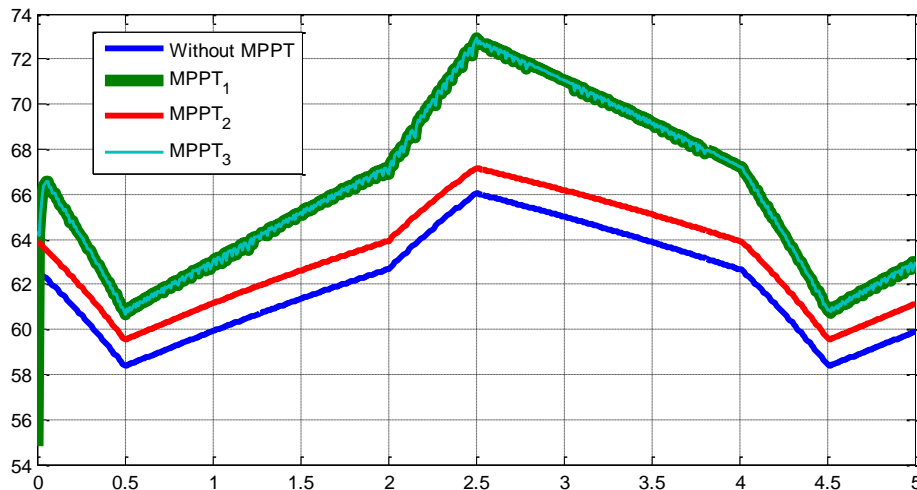


Figura 62 - Potência de saída com controles de potência máxima.

Na Figura 63, mostra-se a diferença de potência à saída do módulo quando utilizados os controladores *MPPT*, tomando como referencia o módulo sem *MPPT*.

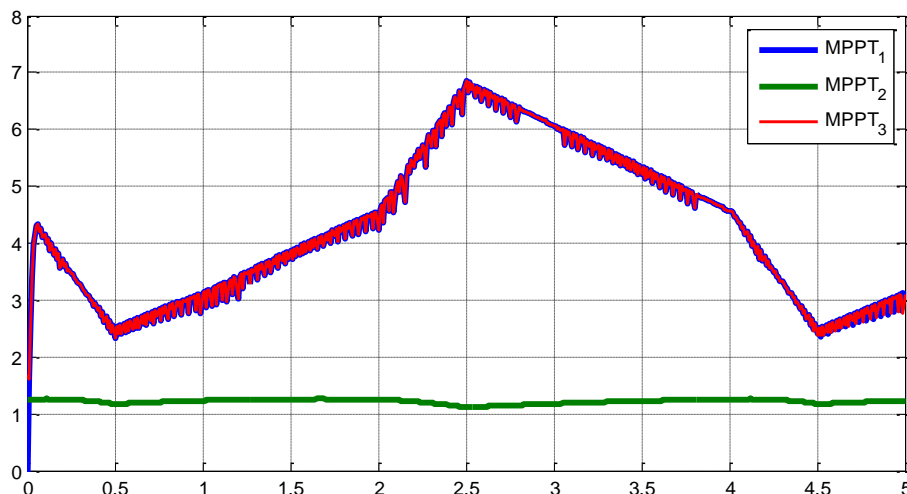


Figura 63 - Diferença da potência de saída com o controlador de potência máxima.

Observa-se claramente que os controladores *MPPT_1* e *MPPT_3* desempenham os melhores resultados, com um ganho de potência que chegou aos **10 %**. O controlador *MPPT_2* também apresentou um ganho de energia quando comparado com o módulo sem *MPPT*. No entanto, é importante realçar que este controlador é algo robusto, sendo que, em outras simulações efetuadas obteve-se uma energia inferior ao módulo sem controlador.

4.2 Biblioteca da energia eólica

Simulação da determinação do C_p

Foi visto anteriormente, o C_p pode ser obtido através de funções de “look up” utilizando tabelas já conhecidas. Outra abordagem, será, a utilização da determinação da curva C_p utilizando as formulas (23) e (24). Na Figura 64 observa-se um exemplo das curvas C_p geradas utilizando a determinação do C_p , ou seja, utilizando o bloco *p*) da Figura 48.

As curvas C_p foram geradas com os seguintes parâmetros:

$$C1 = 0,5; C2 = 116; C3 = 0,4; C4 = 0; C5 = 5; C6 = 21;$$

x-> Não utilizado porque $C4 = 0$.

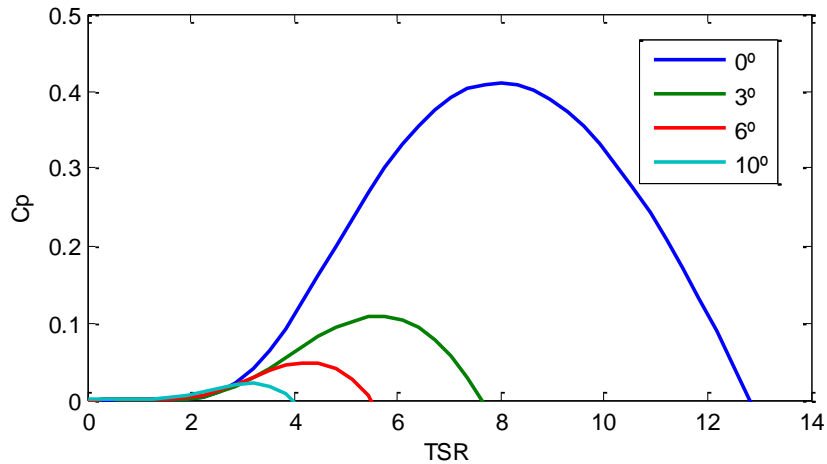


Figura 64 - Curva C_p para diferentes ângulos de pitch.

Observa-se que a variação do ângulo de *pitch* influencia bruscamente o valor do C_p . A eficiência máxima é obtida quando o ângulo de *pitch* é zero, ou seja a pá está a captar o vento todo. Se aplicado um ligeiro aumento do ângulo de *pitch*, para 3° por exemplo, provoca-se uma redução de **75 %** do valor do C_p .

Simulação das transformações mecânicas

As transformações mecânicas são uma parte importante do aerogerador, são nestas que a energia extraída das pás é transportada para o gerador possibilitando a este produzir energia elétrica. Para facilitar a validação dos modelos das transformações mecânicas, foi utilizado um bloco do gerador síncrono de magnetos permanentes (*PMSG*) da biblioteca Simscape com as transformações mecânicas incluídas (o valor de entrada no bloco é o binário mecânico). Tomando as parametrizações do bloco *PMSG* como referência, foram parametrizados os blocos de transformações mecânicas a validar nas mesmas condições. Na Figura 65, observa-se o ambiente Simulink utilizado na validação dos modelos de transformações mecânicas.

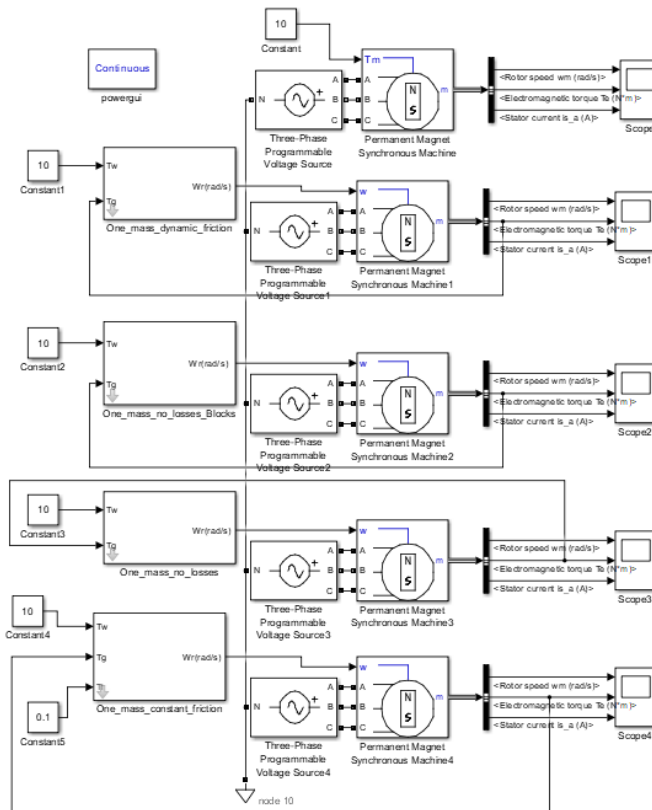


Figura 65 - Ambiente Simulink utilizado na validação dos blocos de transformações mecânicas.

Na Figura 66, é mostrado o binário eletromagnético, e na Figura 67, é mostrada a velocidade de rotação do gerador. Observando as leituras extraídas, conclui-se que o comportamento de todos os blocos foi idêntico. Excetuando-se pequenas diferenças esperadas, por exemplo entre os blocos com perdas dinâmicas e os blocos sem perdas.

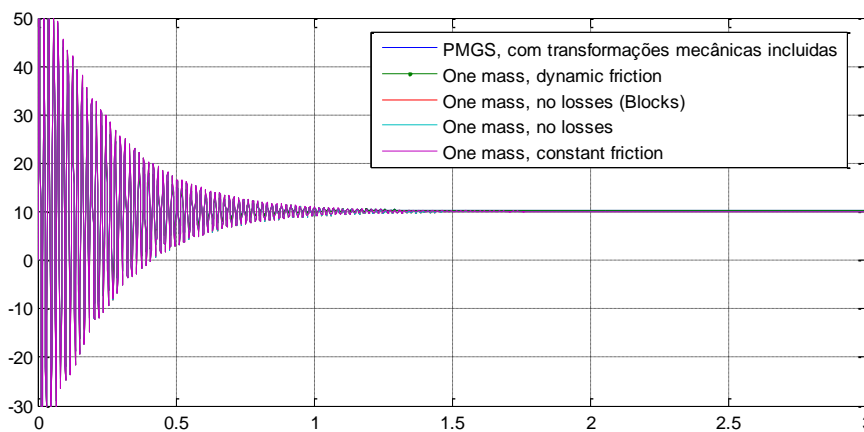


Figura 66 - Binário obtido na validação dos blocos One-mass.

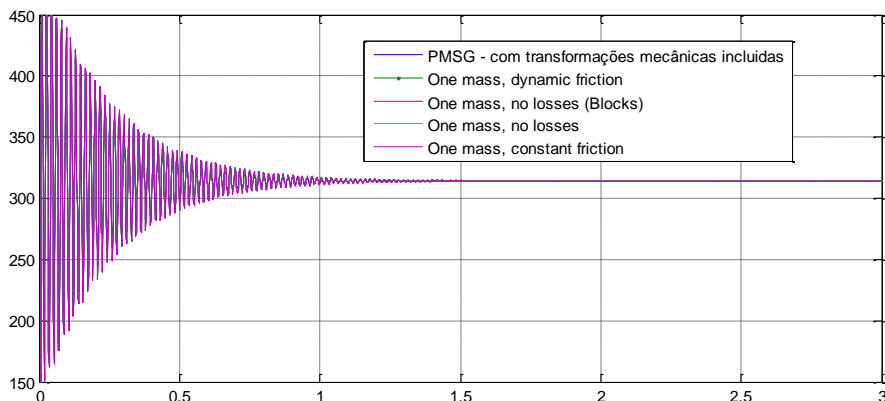


Figura 67 - Velocidade de rotação obtidas na validação dos blocos One-mass.

No geral, o comportamento dos modelos de transformações mecânicas a validar correspondeu ao do bloco *PMSG* do Simscape, valida-se assim, estes modelos de transformações mecânicas. Realça-se que os valores extraídos, nas Figuras 66 e 67, estão sobrepostos, razão este pelo que se vê uma linha única.

Simulação dos geradores

O gerador é sem dúvida um dos elementos de maior importância para a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica. Como não é possível combinar as simulações dos geradores com os resultados reais práticos, utilizou-se os modelos já existentes na biblioteca Simulink, mais precisamente na biblioteca Simscape> SimPowerSystems, para validar cada modelo construído neste trabalho.

I. Geradores síncronos de magnetos permanentes:

A validação dos geradores síncronos de magnetos permanentes (*PMSG*), que corresponde aos blocos *h*), *i*) e *j*) da Figura 48, foi realizada utilizando o gerador de magnetos permanentes da biblioteca Simscape e parametrizando todos os blocos nas mesmas condições. Na Figura 68, mostra-se a disposição dos blocos no ambiente Simulink para a validação dos *PMSGs*.

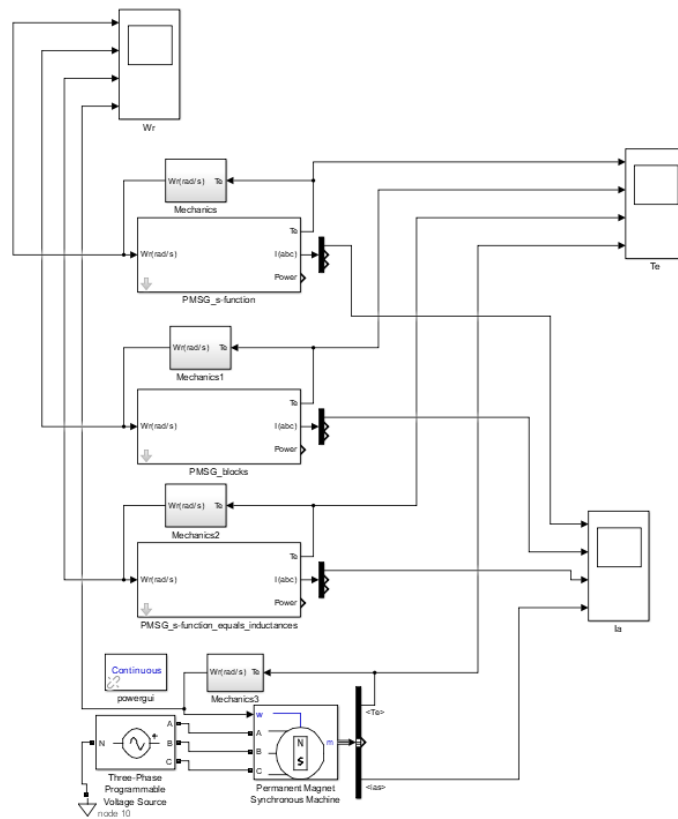


Figura 68 – Ambiente Simulink utilizado na validação dos geradores síncronos de magnetos permanentes.

Extraíu-se da simulação as leituras principais que caracterizam o funcionamento dos geradores, são estas: o binário eletromagnético; a velocidade de rotação; e a corrente na fase L1(A). Na Figura 69, é mostrada a velocidade de rotação obtida na simulação. Na Figura 70, é mostrado o binário eletromagnético e a corrente na fase L1(A).

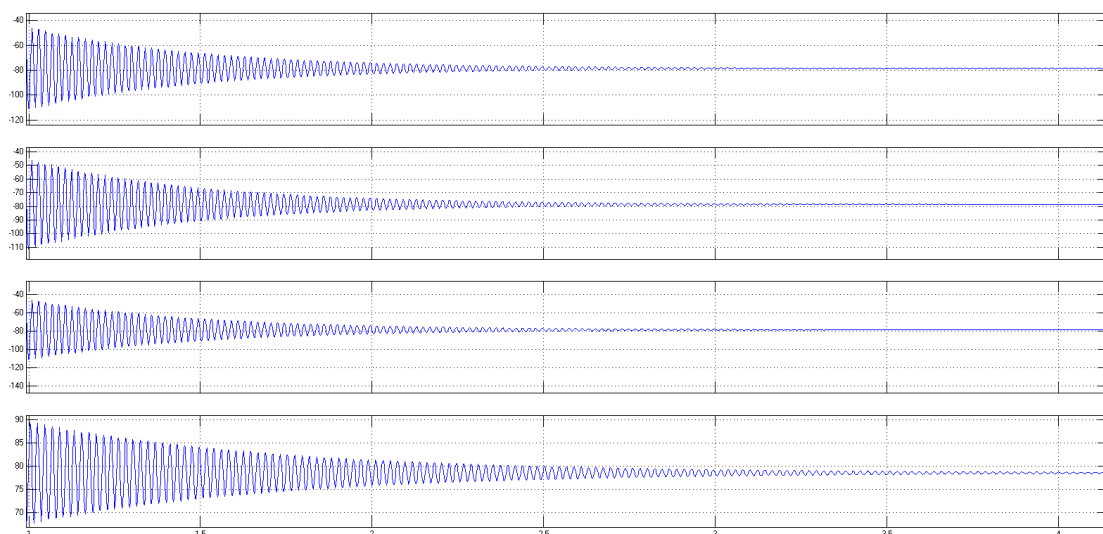


Figura 69 – Simulação dos geradores síncronos de magnetos permanentes, velocidade de rotação.

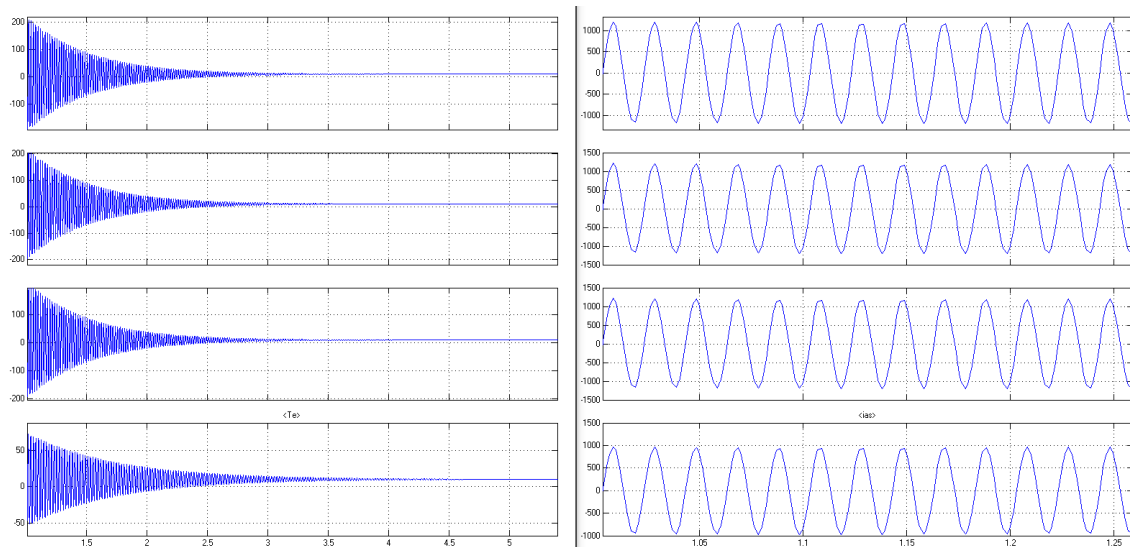


Figura 70 – Simulação dos geradores síncronos de magnetos permanentes, binário eletromecânico e corrente na fase L1.

Observando as Figuras 69 e 70, conclui-se que existe uma correspondência das leituras extraídas dos vários blocos. Valida-se assim o comportamento dos modelos dos geradores síncronos de magnetos permanentes aqui construídos.

2. Gerador síncrono:

Semelhantemente, ao realizado com os geradores síncronos de magnetos permanentes, foi preparado um ambiente Simulink para validar o modelo do gerador síncrono (Figura 48, i)). Comparou-se a operação do modelo do gerador síncrono com o bloco do gerador síncrono retirado da biblioteca Simscape. Na Figura 71, observa-se o ambiente Simulink utilizado para realizar a validação do gerador síncrono.

As leituras que caracterizam o comportamento do gerador síncrono foram extraídas da simulação. Na Figura 72, observa-se binário eletromagnético e a velocidade de rotação do rotor. Na Figura 73, observa-se a corrente do campo de excitação e corrente da fase L1(A).

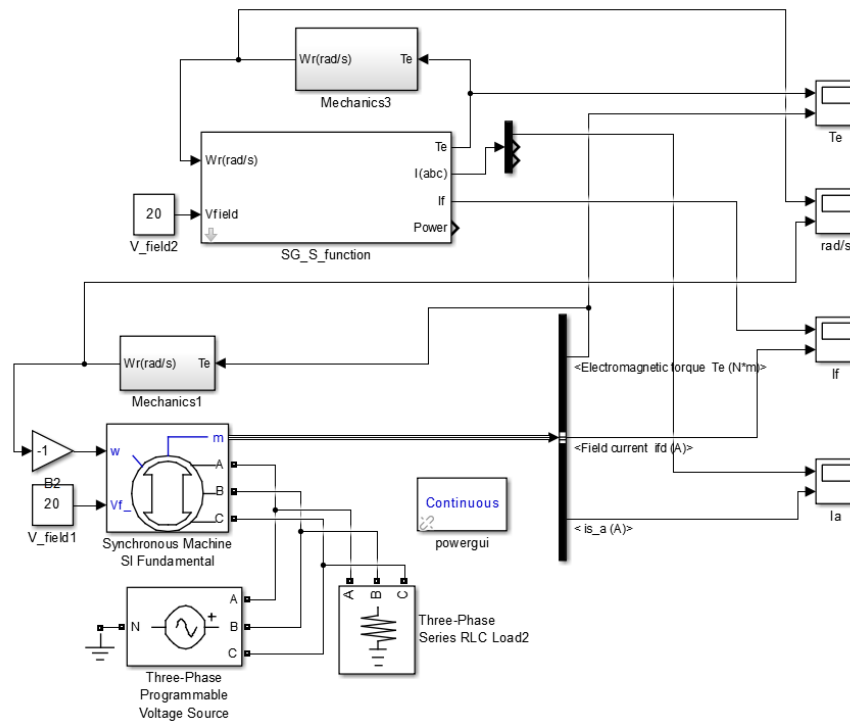


Figura 71 – Ambiente Simulink utilizado na validação do gerador síncrono.

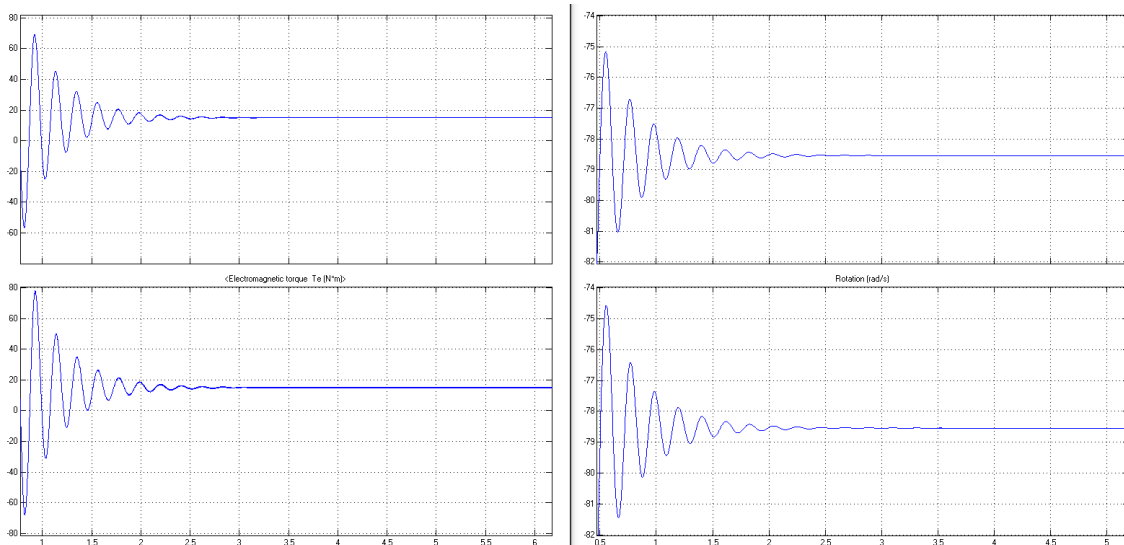


Figura 72 - Simulação do gerador síncrono, binário eletromecânico e velocidade de rotação do rotor.

Comparando os resultados dos dois blocos, da Figura 72, conclui-se a veracidade do comportamento do modelo construído.

A Figura 73, vem só a reforçar a validação do gerador síncrono, uma vez que o comportamento da corrente de excitação e da corrente da fase L1(A) dos dois blocos é idêntica.

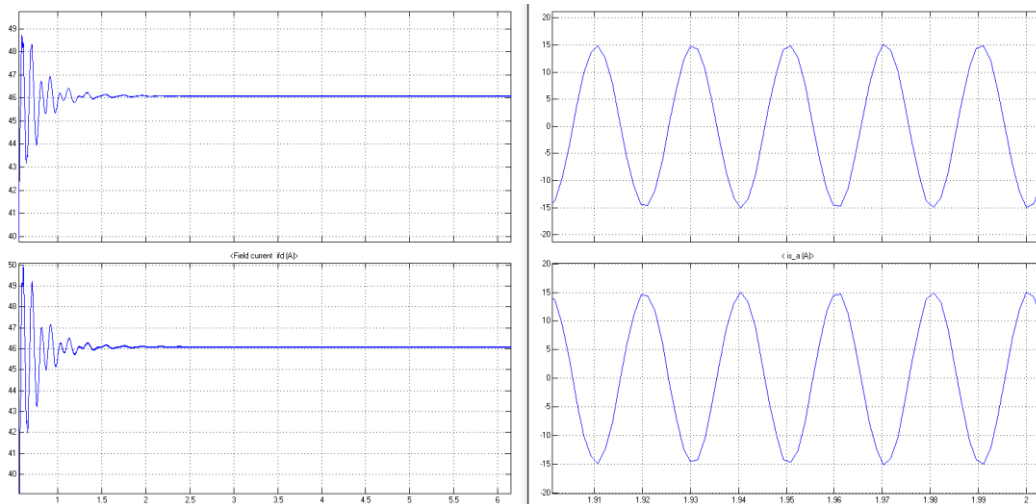


Figura 73 - Simulação do gerador síncrono, corrente de excitação e corrente da fase L1.

3. Gerador indutivo de gaiola de esquilo:

Semelhantemente aos casos anteriores, utilizou-se um ambiente Simulink para validar os modelos dos geradores indutivos da gaiola de esquilo. Foi utilizado, como referência, o bloco de um gerador indutivo da biblioteca Simscape para comparar os resultados.

Na Figura 74, observa-se o ambiente Simulink utilizando para validar os geradores indutivos (Figura 48, *m*) e *n*)).

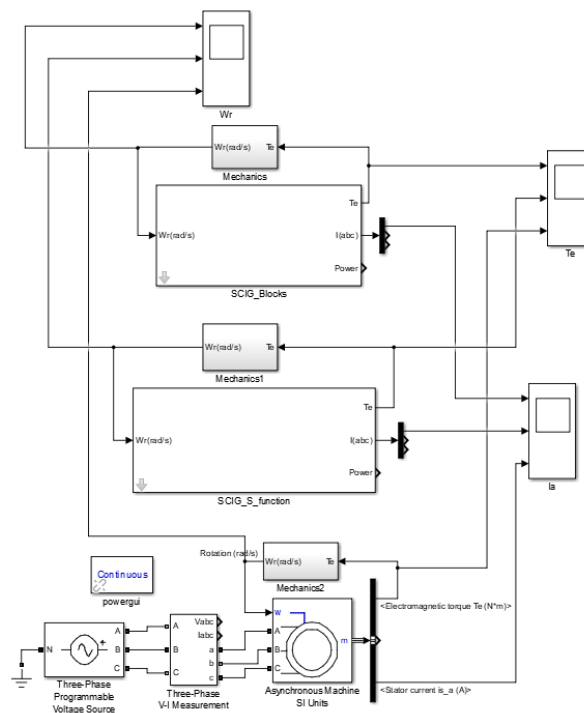


Figura 74 – Ambiente Simulink utilizado na validação dos geradores indutivos com gaiola de esquilo.

As leituras principais que caracterizam o funcionamento do gerador foram extraídas. Na Figura 75, mostra-se o binário eletromagnético e a corrente da fase L1(A).

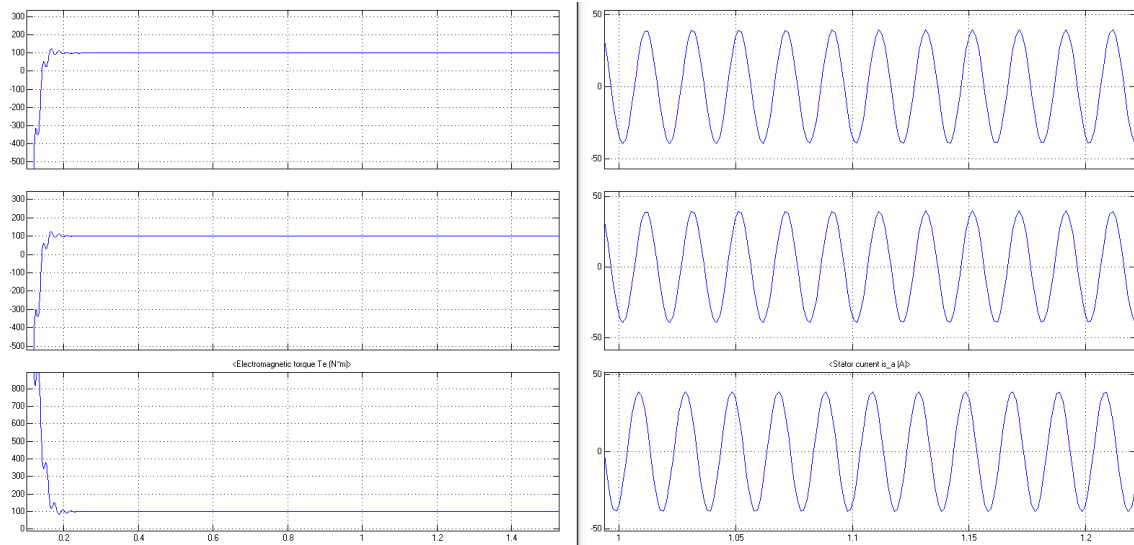


Figura 75 - Simulação dos geradores indutivos com gaiola de esquilo, binário eletromecânico e corrente da fase L1.

Comparando as leituras extraídas, dos modelos a validar, com o bloco do gerador indutivo da biblioteca Simscape, prova-se a veracidade dos modelos construídos uma vez, que o comportamento destes foi de acordo com o comportamento do bloco tomado como referência.

Simulação do aerogerador

Para realizar a simulação de um aerogerador, é necessário combinar os diferentes blocos dos vários componentes do aerogerador a estudar. Na Figura 76, mostra-se o ambiente Simulink utilizado para simular um aerogerador. Neste caso, foi simulado um aerogerador de eixo horizontal com um gerador síncrono de magnetos permanentes. Os parâmetros utilizados nesta simulação podem ser encontrados nos anexos.

Em alguns modelos dos geradores, a rotação de saída do gerador é negativa, existe assim a necessidade de aplicar um conversor (*gain*) para mudar o sinal negativo da rotação para sinal positivo, evitando assim que ocorram erros de cálculos na determinação da razão de velocidade de ponta da pá (*TSR*).

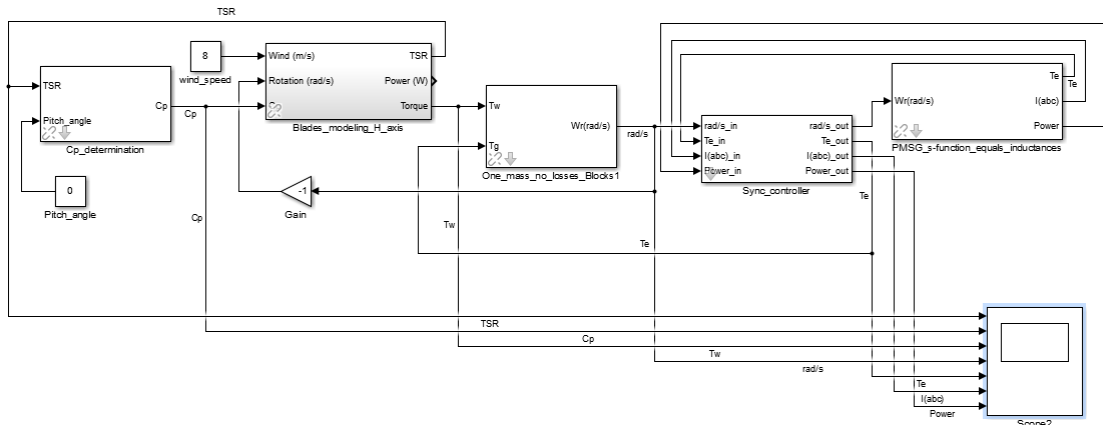


Figura 76 - Ambiente Simulink utilizado para simular o aerogerador.

Na Figura 77, é representado o binário das pás e o binário eletromagnético do gerador. Conclui-se que existe uma correspondência direta entre os dois binários, tal deve-se também à inexistência de perdas mecânicas, sendo todo o binário das pás direcionado para a produção de energia elétrica.

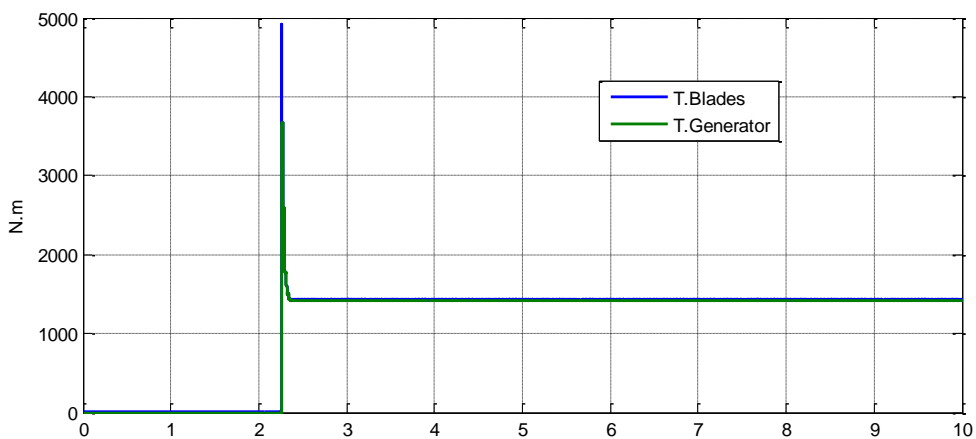


Figura 77 - Simulação do aerogerador, Binário eletromagnético vs Binário das pás.

Na Figura 78, observa-se a velocidade de rotação do eixo do gerador. Como a razão de multiplicação da caixa de velocidades é **1:1**, a velocidade de rotação do eixo do gerador é idêntica à velocidade de rotação do eixo das pás do aerogerador. Observa-se, que nos instantes iniciais a velocidade de rotação aumenta lentamente, no entanto, a dado ponto, a velocidade aumenta bruscamente até ser atingida a velocidade de sincronismo do gerador.

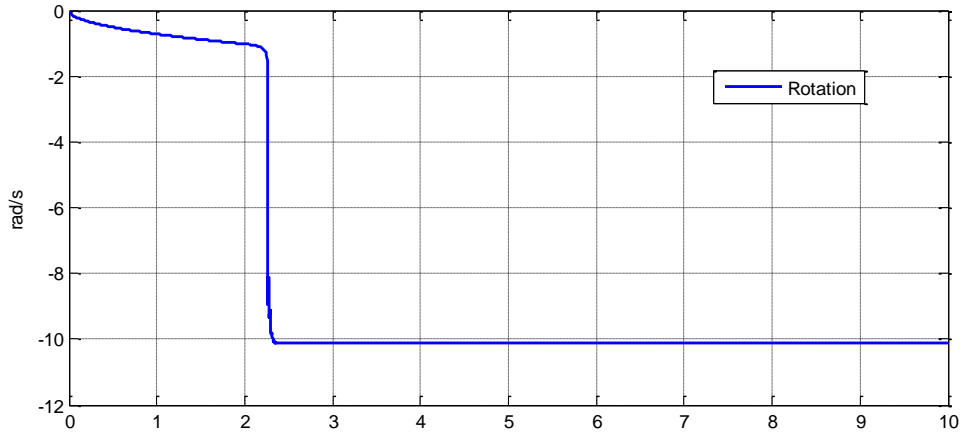


Figura 78 - Simulação do aerogerador, rotação das pás.

Na Figura 79, está representada a corrente de saída das três fases do gerador. Observa-se, na Figura 79, que nos instantes iniciais o bloco de controlo de sincronismo não dá sinal de arranque, mantendo-se assim a corrente nula. Após existir o comando para ligar o gerador, surge uma corrente transitória de curta duração que posteriormente é amortecida, estabilizando-se assim a corrente de saída do gerador.

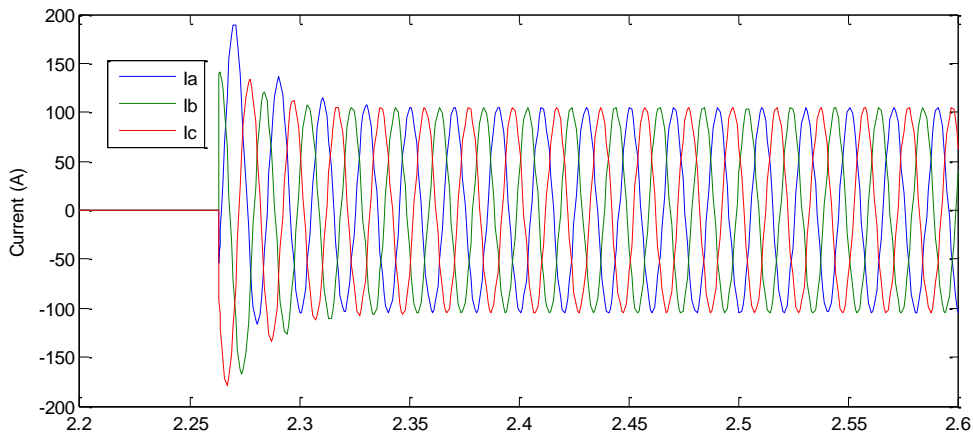


Figura 79 - Simulação do aerogerador, corrente de saída do gerador.

Na Figura 80, estão representadas as leituras do C_p e da TSR . Observando-se a Figura 80, nota-se que, inicialmente a TSR e o C_p aumentam lentamente. No momento que a TSR atinge o valor de **3**, o valor do C_p cresce bruscamente, atingido por um instante o valor máximo de **0,4**. Entende-se melhor esta relação entre o C_p e o TSR observando novamente a Figura 64.

Depois de estabilizar, o C_p assume o valor aproximado de **0,19**, tal deve-se ao facto de a rotação de sincronismo do gerador impossibilitar ao valor do TSR potenciar o C_p no máximo, devido à relação direta entre a TSR e a velocidade de rotação das pás.

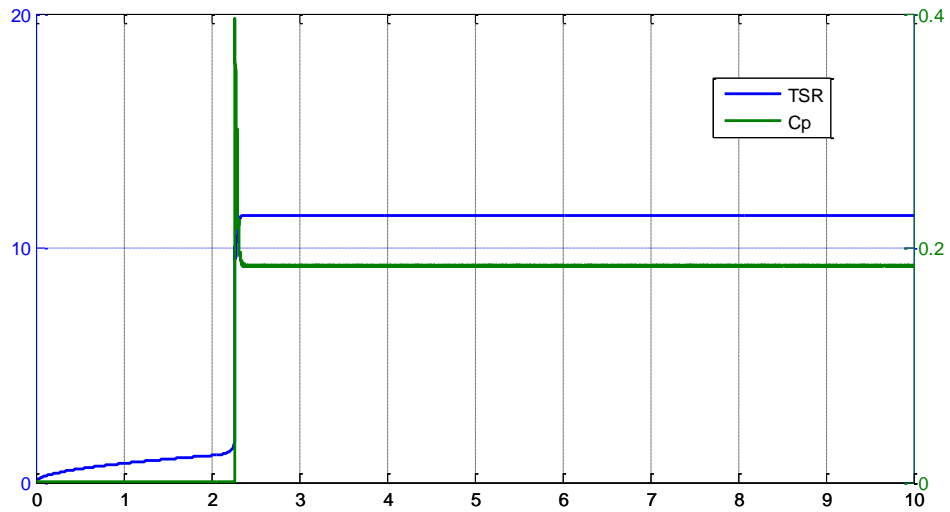


Figura 80 - Simulação do aerogerador, TSR e C_p .

5. CONCLUSÕES

Este projeto baseou-se na criação de bibliotecas duas no Simulink para a simulação de sistemas eólicos e solares, recorrendo às S-Functions.

Devido a restrições temporais e laborais, não foi possível validar os modelos aqui construídos com resultados práticos. No entanto, recorreu-se a outros métodos para validar os modelos. No caso da biblioteca de energia solar foram utilizados os resultados obtidos em um outro estudo, de forma a validar os modelos aqui construídos. Já no caso da biblioteca de energia eólica, os modelos construídos foram validados com recurso a blocos da biblioteca Simscape> SimPowerSystems, permitindo assim verificar a correspondência dos resultados simulados.

Conclui-se assim, que as ferramentas informáticas aqui elaboradas, simulam adequadamente os sistemas de energia eólica e energia solar, sendo adequadas para estudar este tipo de sistemas. Além disso, salienta-se a importância que este tipo de ferramentas que pode vir a ter no ensino, onde é possível simular e compreender o funcionamento dos sistemas eólicos e solares.

Trabalhos futuros

Devido à pequena janela temporal, não foi possível explorar exaustivamente os temas aqui estudados, propõe-se assim alguns tópicos para a continuação deste trabalho:

Biblioteca de energia solar

- Construção de modelos de inversores;
- Construção de modelos para simular as baterias;
- Construção de modelos de rastreamento da orientação do sol;

Biblioteca de energia eólica

- Construção de modelos de geradores com velocidade variável;
- Construção de modelos de controlo para maximizar a potência de saída;
- Construção de modelos de retificadores e inversores;

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] - El Chaar, L., Lamont, L. A., Elzein, N. (2011) “Wind Energy Technology – Industrial Update”, IEEE;
- [2] – “Renewables 2018 – Global Status Report”, REN21;
- [3] – “2018 Anuário”, APREN
- [4] – “Annual Market Update 2017 – Global Wind Report”, Global Wind Energy Council;
- [5] - Troen, I., Petersen e., (1989) “European Wind Atlas”, Risø National Laboratory;
- [6] - GeoPortal Visualizador de mapas, Atlas Eólico. Disponível em <http://geoportal.ineg.pt/geoportal/mapas/index.html?mapa=AtlasEolico> [Consultado em 02/08/2018];
- [7] - Principle Power, WindFloat. Disponível em <http://www.principlepowerinc.com/en/windfloat> [Consultado em 02/08/2018];
- [8]- Picolo, A., Bühler, A., Rampinelli, G. (2014) “Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica”, Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol.36;
- [9]- “Aerogerador de Eixo Vertical”, Energia Eólica, <https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/aerogerador-de-eixo-horizontal/gerador-eolico-de-eixo-vertical/> [Consultado em 19/09/2018];
- [10] - “Portal Energia, Como funciona um aerogerador”. <http://www.portal-energia.com/funcionamento-de-um-aerogerador> [Consultado em: 24/04/2018];
- [11] – “Improvements in technology”, <http://www.windenergy.org.nz/improvements-in-technology> [Consultado em 18/08/2018];
- [12] – “Technology status”, <https://www.wind-energy-the-facts.org/technology-status-7.html> [Consultado em 18/08/2018];
- [13]- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., (2001) “Wind Energy Handbook”, John Wiley & Sons, LTD;
- [14]- “ENERCON E-44 Power Curve”, <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/531-enercon-e-44#powercurve>, [Consultado em 21/08/2018];
- [15] - Resende, F. EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA PARA LIGAÇÃO À REDE. Universidade Lusófona do Porto;
- [16] – Ranabhat, K., et all, (2016) “An Introduction to Solar Cell Technology”, Journal of Applied Engineering Science, Vol. 14, pp. 481-491;
- [17] - Larry M., (2011) “Rasc Calgary Centre A complete Guide to Rught Ascension and Declination”, www.calgary.rasc.ca/radeccl.htm [Consultado em 03/08/2018];
- [18] - Rosa, Daniel, J.M., (2003) “Caracterização da Radiação Solar: O caso da Cidade Universitária/USP e da Ilha do Cardoso/Cananéria”, Universidade de São Paulo;

- [19]- “Conceitos de Energia Solar Fotovoltaica – Como a radiação solar varia ao longo do dia”, SolasBrasil, <http://www.solarbrasil.com.br/blog-da-energia-solar/129-conceitos-de-energia-solar-fotovoltaica-como-a-radiacao-solar-varia-ao-longo-do-dia> [Consultado em 02/09/2018];
- [20] - Rosa, M.B., (1994) “Estimativas da radiação solar directa normal através de um modelo parametrizado, na ausência de nuvens”, Inst. Nac de Pesquisas Espaciais;
- [21] - Rout, S., (2015) “Mathematical Modelling of Grid connected Photovoltaic System using MATLAB/SIMULINK and Hardware Implementation”, International Conference on Emergent Trends in Computing and Communication, International Journal of Computer Applications;
- [22]- Hanania, J., Stenhouse, K., Donev, J., (2015) “Photovoltaic effect”, https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect [Consultado em 29/08/2018];
- [23] - “SamlexSolar, Solar (PV) Cell Module, Array”, <http://www.samlexsolar.com/learning-center/solar-cell-module-array.aspx>. [Consultado em: 23/04/2018];
- [24] – Hansen, A., Sorensen, P., Hansen, L., Bindner, H., (2001) “Models for a stand-alone PV system”, DTU Library;
- [25] - Manyonge, A. W., Ochieng, R. M., Onyango, F. N., Shichikha, J. M. (2012) “Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System: Power Coefficient Analysis”, Applied Mathematical Sciences: Vol. 6, no. 91, p.4527-4536;
- [26] - “North America Clean Energy, Rooftop Wind Power in Cities is Here”, (2015). <http://www.nacleanenergy.com/articles/20667/rooftop-wind-power-in-cities-is-here> [Consultado em: 23-04-2018];
- [27]- Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S., “Development of a Wind Turbine Simulator for Wind Generator Testing”;
- [28]- Martinez J., (2007) “Modelling and Control of Wind Turbines”, Master Thesis, Imperial College London;
- [29]- Iov F., Hansen A., Sorensen P., Blaabjerg F., (2004) “Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink”, Aalborg University;
- [30]- Örs M., (2009) “Maximum Power Point Tracking for Small Scale Wind Turbine With Self-Excited Induction Generator”, CEAI, Vol.11, No.2 pp.30-34;
- [31]- Apata O., Oyedokun D., (2017) “Wind Turbine Generators: Conventional and Emerging Technologies”, IEEE PES-IAS PowerAfrica, pp. 606-611;
- [32]- Krause P., Wasynczuk O., Sudhoff S., (2002) “Analysis of Electrical Machinery and Drive Systems”, IEEE Press, 2^a edition;
- [33]- Leedy A., (2013) “Simulink/MATLAB Dynamic Induction Motor Model for Use as A Teaching and Research Tool”, IJSCE, Vol.3;

- [34]- Onah C., Reuben J., (2016) “Dynamic Modelling and Simulation of Salient Pole Synchronous Motor Using Embedded Matlab”, American Journal of Engineering Research, Vol. 5, pp. 318-325;
- [35]- Dandeno P., Kundur P., Umans S., Kamwa I., (2003) “IEEE Guide for Generator Modeling Practices and Applications in Power Systems Stability Analyses”, IEEE;
- [36] - Rolán A., Luna, Á., Vázquez, D. A. (Julho 2009) “Modeling fo a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator”, International Symposium of Industrial Electronics, Seoul Korea, p.734-739;
- [37] – Mansour M., Mansouri M., Mmmouni M., (2011) “Study and Control of a Variable-Speed Wind-Energy System Connected to the Grid”, International Journal of Renewable Energy Research. Vol.1, No.2, pp. 96-104;
- [38] - Bellia, H., Youcef, R., Fatima, M. (2014) “A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB”, NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics: Elsevier, p.53-61;
- [39] – Azzouzi M., Popescu D., Bouchahdane M., (2016) “Modeling of Electrical Characteristics of Photovoltaic Cell Considering Single-Diode Model”, Journal of Clean Energy Technologies, Vol.4, No. 6;
- [40] – Bouraiou A., Hamouda M., Chaker A., et all, (2015) “Modeling and Simulation of Photovoltaic Module and Array based on One and Two Diode Model Using Matlab/Simulink”, ELSEVIER, Energy Procedia 74, pp. 864-877;
- [41] – King D., Boyson W., Kratochvill J., (2004) “Photovoltaic Array Performance Model”, Sandia Report;
- [42] – Pereira R., Melício R., Mendes V., Joyce A., (2014) “PV System with Maximum Power Point Tracking: Modeling, Simulation and Experimental Results”, ELSEVIER, Procedia Technology 17, pp. 495-501;
- [43] – Trabelsi H., Elloumi M., Abid H., Kharrat M., (2017) “MPPT controllers for PV array panel connected to Grid”, International conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering;
- [44] – Nedumgatt J., Jayakrishnan B., Umashankar S., Vijayakumar D., “Perturb and Observe MPPT Algorithm for Solar PV Systems-Modeling and Simulation”;

ANEXOS

Parâmetros utilizados, na validação dos modelos dos módulos fotovoltaicos.

Tabela 3 - Parâmetros do modelo de um díodo

Modelo de um díodo	
$I_{sc,STC}$	5.252 A
$V_{oc,STC}$	20.359 V
a	1.3
R_s	0.39 Ω
R_p	149.36 Ω
N_s	36
k_i	0.06
k_v	-0.36

Tabela 4 - Parâmetros do modelo de dois díodos

Modelo de dois díodos	
$I_{sc,STC}$	5.252 A
$V_{oc,STC}$	20.359 V
$a1$	1
$a2$	1.2
R_s	0.39 Ω
R_p	149.36 Ω
N_s	36
k_i	0.06
k_v	-0.36

Parâmetros utilizados na simulação do aerogerador

Tabela 5 - Parâmetros da simulação do aerogerador

Entradas externas			
Velocidade do vento		8 (m/s)	
Ângulo de <i>pitch</i>		0 (°)	
Parâmetros da curva Cp			
C1	0,5	C2	116
C3	0,4	C4 e X	0
C5	5	C6	21
Parâmetros do bloco aerodinâmico (pás)			
Raio das pás		9 (m)	
Densidade do ar		1,2 (kg/m ³)	
Parâmetros do bloco de transformações mecânicas			
Momento de inércia das pás		0 (kg.m ²)	
Momento de inércia do gerador		0,3 (kg.m ²)	
Razão de transformação da caixa		1	
Parâmetros do bloco do gerador			
Resistência do estator		0,425 (Ω)	
Indutância cíclica do estator		0,009 (H)	
Fluxo do magneto permanente		0,433 (Wb)	
Número de pares de polos		31	
Tensão		283 (V)	
Frequência		50 (Hz)	
Parâmetros do bloco de controlo de sincronismo			
Velocidade mínima pra conectar o gerador		8 (rad/s)	

Transformação de Park

A transformação das coordenadas do sistema de eixos abc para o sistema de eixos $dq0$ é feita aplicando a transformada de Park. Nesta transformação, é utilizada uma transformação intermédia do sistema de eixos abc para o sistema de eixos $\alpha\beta\gamma$ e depois para o sistema de eixos $dq0$.

Estas transformações podem ser efetuadas através de:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0}^{-1} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad T_{\alpha\beta 0}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = T_{dq0}^{-1} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} \quad T_{dq0}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pode-se combinar estas últimas duas transformações na seguinte transformação.

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad T^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$