



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Pedro Henrique Tenório de Magalhães de Oliveira

**Modelagem de um sistema de microgeração de energia solar-eólico com  
busca de ponto de máxima potência de operação**

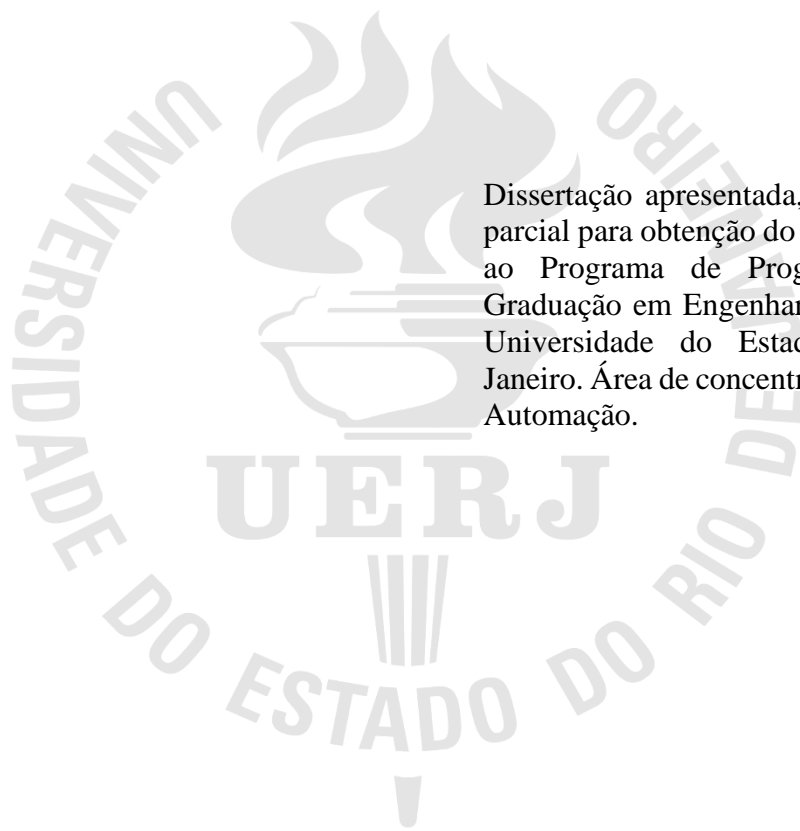
Rio de Janeiro

2020

Pedro Henrique Tenório de Magalhães de Oliveira

**Modelagem de um sistema de microgeração de energia solar-eólico com busca de ponto de máxima potência de operação**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle e Automação.



Orientador: Prof. Dr. Téo Cerqueira Revoredo

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

O48 Oliveira, Pedro Henrique Tenório de Magalhães de.  
Modelagem de um sistema de microgeração de energia solar-  
eólico com busca de ponto de máxima potência de operação /  
Pedro Henrique Tenório de Magalhães de Oliveira. – 2020.  
128f.

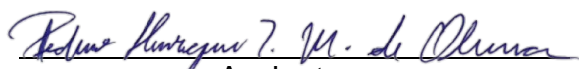
Orientador: Téo Cerqueira Revoredo.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Energia elétrica - Produção  
- Teses. 3. Energia - Fontes alternativas - Teses. 4. SIMULINK  
(Programa de computador) - Teses. I. Revoredo, Téo Cerqueira.  
II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de  
Engenharia. III. Título.

CDU 004.42:620.91

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial  
desta tese, desde que citada a fonte.

  
Assinatura

16/12/2020

\_\_\_\_\_  
Data

Pedro Henrique Tenório de Magalhães de Oliveira

**Modelagem de um sistema de microgeração de energia solar-eólico com busca de ponto de máxima potência de operação**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Controle e Automação.

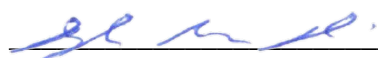
Aprovado em 20 de setembro de 2020.

Banca Examinadora:



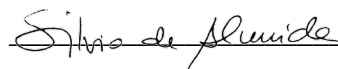
Prof. Dr. Téo Cerqueira Revoredo

Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Douglas Mota Dias

Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Silvío Carlos Anibal de Almeida

Departamento de Engenharia Mecânica - UFRJ

Rio de Janeiro

2020

## RESUMO

OLIVEIRA, Pedro Henrique Tenório de Magalhães de. **Modelagem de um sistema de microgeração de energia solar-eólico com busca de ponto de máxima potência de operação**. 2020. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

O panorama energético mundial está em transição e as fontes de energia limpas ganham cada vez mais espaço. Nesse cenário, destacam-se gerações individuais com mais de uma fonte, denominadas sistemas híbridos. Esses sistemas podem ser utilizados para alimentar plantas completas de forma isolada ou ligados à linha de transmissão. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador para um sistema de microgeração solar-eólico isolado, com aplicação de algoritmos de busca para definir o ponto de máxima potência de operação. O sistema inclui inversor para permitir alimentação de cargas em corrente alternada e elemento armazenador de energia. São modeladas as fontes de energia, os conversores de tensão e os sistemas de busca pelo ponto de máxima potência. Resultados da aplicação de quatro algoritmos de busca são apresentados, a saber: Perturbar e Observar (P&O), Condutância Incremental (CI), Lógica Fuzzy e Redes Neurais Artificiais (RNA) com base em dados reais coletados na estação meteorológica do INMET, localizada em Arraial do Cabo, no Rio de Janeiro.

Palavras-chave: Microgeração de energia; Energia renovável; Produção isolada; Sistema híbrido; MPPT.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Pedro Henrique Tenório de Magalhães de. **Modeling of a solar-wind microgeneration system with maximum power point tracking**. 2020. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

The global energy production it is changing, leading the way for clean energy. In this scenario, individual generations with more than one source stand out, called hybrid systems. These systems can be used to feed complete plants in isolation or connected to the transmission line. In this context, this work presents the development of a simulator for an isolated solar-wind microgeneration system, with the application of search algorithms to define the point of maximum operating power. The system includes an inverter to allow the supply of alternating current loads and an energy storage element. Energy sources, voltage converters and search systems for the maximum power point are modeled. Results of the application of four search algorithms are presented, namely: Disturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (CI), Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks (RNA) based on real data collected at the INMET weather station, located in Arraial do Cabo, in Rio de Janeiro.

Keywords: Micro-generation of energy; Renewable energy; Isolated production; Hybrid system; MPPT.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidade instalada mundial para energia eólica e solar .....	14
Figura 2 – Série histórica da capacidade instalada no Brasil .....	14
Figura 3 – Média de ventos e potencial solar .....	15
Figura 4 – Sistema híbrido isolado com painel solar e turbina eólica.....	17
Figura 5 – Representação de um sistema híbrido isolado .....	17
Figura 6 – Composição de módulo fotovoltaico .....	21
Figura 7 – Mudança anual na intensidade da irradiação solar extraterrestre.....	22
Figura 8 – Comparação de diferentes curvas de irradiação .....	23
Figura 9 – Eficiência entre 1975 e 1990.....	24
Figura 10 – Eficiência das melhores células entre 1990 e 2019.....	25
Figura 11 – Representação das ligações covalentes do silício .....	26
Figura 12 – Bandas de energia de um semicondutor.....	27
Figura 13 – Processo de formação e recombinação .....	28
Figura 14 – Material do tipo n, doador de elétrons .....	28
Figura 15 – Material do tipo p, aceitador de elétrons.....	28
Figura 16 – Movimentação de cargas na célula solar quando excitada por fótons .....	29
Figura 17 – Diagrama de banda de energia .....	29
Figura 18 – Energia relacionada ao comprimento de onda .....	30
Figura 19 – Sensibilidade espectral para diferentes materiais.....	31
Figura 20 – Descrição física dos parâmetros do painel.....	32
Figura 21 – Célula solar em circuito elétrico .....	33
Figura 22 – Modelo equivalente simplificado.....	33
Figura 23 – Circuito equivalente completo .....	34
Figura 24 – Curva característica I-V de um diodo .....	35
Figura 25 – Construção da curva característica I-V de uma célula solar .....	35
Figura 26 – Efeito da resistência $R_p$ no circuito .....	37
Figura 27 – Efeito da resistência $R_s$ no circuito .....	38
Figura 28 – Fluxograma para determinação de $R_s$ e $R_p$ .....	39
Figura 29 – Modelo elétrico de uma célula solar no <i>Simulink</i> .....	41
Figura 30 – Blocos internos para teste da célula solar .....	42
Figura 31 – Curvas características da célula solar que compõe o painel YL020P-17b .....	42

Figura 32 – Painel solar gerado por associação de células .....	43
Figura 33 – Curvas características do painel formado por células .....	43
Figura 34 – Representação da corrente que flui pelo diodo .....	44
Figura 35 – Curvas características do painel formado por circuito direto.....	44
Figura 36 – Curvas da associação de 12 painéis .....	45
Figura 37 – Etapas na produção de energia eólica .....	46
Figura 38 – Diagrama simplificado para formação dos ventos.....	47
Figura 39 – Diagrama geral para formação dos ventos .....	48
Figura 40 – Exemplos de turbina.....	52
Figura 41 – Relação entre a velocidade do vento e a potência disponível .....	53
Figura 42 – Área aproximada de um rotor Darrieus.....	54
Figura 43 – Representação do ângulo de <i>pitch</i> .....	55
Figura 44 – Curva típica de potência.....	56
Figura 45 – Blocos disponíveis no <i>Simulink</i> para geração eólica .....	57
Figura 46 – Faixa de operação do motor .....	58
Figura 47 – Gerador com entrada e saídas em pu.....	58
Figura 48 – Curva de potência da turbina sem controle .....	59
Figura 49 – Controle do ângulo de <i>pitch</i> .....	60
Figura 50 – Curva de potência com controle de <i>pitch</i> .....	60
Figura 51 – Curva de potência da turbina eólica com controlador.....	61
Figura 52 – Implementação da turbina no <i>Simulink</i> .....	61
Figura 53 – Circuito conversor <i>Buck</i> .....	63
Figura 54 – Formas de onda do conversor <i>Buck</i> .....	64
Figura 55 – Circuito conversor <i>Boost</i> .....	65
Figura 56 – Formas de onda do conversor <i>Boost</i> .....	66
Figura 57 – Circuito conversor <i>Buck-Boost</i> .....	67
Figura 58 – Formas de onda obtidas no conversor <i>Buck-Boost</i> .....	67
Figura 59 – Circuito Inversor ponte H .....	69
Figura 60 – Formas de onda inversor .....	69
Figura 61 – Diagrama de um gerador PWM .....	70
Figura 62 – Formas de onda de entrada e saída do gerador PWM.....	70
Figura 63 – Circuito conversores CC-CC.....	71
Figura 64 – Resposta dos conversores CC para sistema fotovoltaico e eólico .....	73
Figura 65 – Resposta do conversor <i>Boost</i> .....	74



Figura 66 – Implementação do circuito inversor no <i>Simulink</i> .....	74
Figura 67 – Resultados da simulação do circuito inversor .....	75
Figura 68 – Curvas para sistema fotovoltaico com diferentes densidades de irradiação .....	77
Figura 69 – Curvas para sistema fotovoltaico para diferentes temperaturas.....	78
Figura 70 – Influência da carga em painéis fotovoltaicos .....	78
Figura 71 – Curva de potência em relação a rotação do gerador .....	79
Figura 72 – Fluxograma do algoritmo Perturbar e Observar.....	80
Figura 73 – Conexões para implementação do P&O .....	81
Figura 74 – Potência e tensão do sistema fotovoltaico com MPPT P&O .....	81
Figura 75 – Potência do sistema fotovoltaico com MPPT P&O para diferentes densidades de irradiação .....	82
Figura 76 – Potência e tensão do gerador eólico com MPPT P&O .....	82
Figura 77 – Potência do sistema eólico com MPPT P&O para diferentes velocidades de vento .....	83
Figura 78 – Ideia básica do método condutância incremental.....	83
Figura 79 – Fluxograma do algoritmo Condutância Incremental.....	84
Figura 80 – Potência e tensão do sistema fotovoltaico com MPPT Condutância Incremental	85
Figura 81 – Potência do sistema fotovoltaico com MPPT CI para diferentes densidades de irradiação .....	86
Figura 82 – Potência e tensão do sistema eólico com MPPT Condutância Incremental.....	86
Figura 83 – Potência do sistema eólico com MPPT CI para diferentes velocidades de vento.	87
Figura 84 – Diagrama das etapas internas do controlador Fuzzy .....	88
Figura 85 – Função de pertinência para entradas e saída .....	89
Figura 86 – Janela de configuração da lógica fuzzy.....	90
Figura 87 – Potência e tensão do sistema fotovoltaico com MPPT Fuzzy.....	91
Figura 88 – Potência do sistema fotovoltaico com MPPT Fuzzy para diferentes densidades de irradiação .....	91
Figura 89 – Potência e tensão do sistema eólico com MPPT Fuzzy .....	92
Figura 90 – Potência do sistema eólico com MPPT Fuzzy para diferentes velocidades de vento .....	92
Figura 91 – Estrutura biológica de um neurônio .....	93
Figura 92 – Estrutura da reprodução de um neurônio artificial.....	93
Figura 93 – Estrutura de uma Rede Neural Artificial.....	94
Figura 94 – Típicas funções de ativação .....	95

Figura 95 – Estrutura da implementação da RNA.....	96
Figura 96 – Arquitetura da RNA para sistema fotovoltaico .....	97
Figura 97 – Histograma de erros da RNA usada no sistema solar .....	97
Figura 98 – Potência e tensão para o sistema fotovoltaico com RNA .....	98
Figura 99 – Potência do sistema fotovoltaico com MPPT RNA para diferentes densidades de irradiação .....	98
Figura 100 – Estrutura da RNA para sistema eólico .....	99
Figura 101 – Curva de potência do bloco aerodinâmico .....	99
Figura 102 – Histograma de erros da RNA usada no sistema eólico .....	100
Figura 103 – Potência e tensão para o sistema eólico com RNA .....	101
Figura 104 – Potência do sistema eólico com MPPT RNA para diferentes velocidades de vento .....	101
Figura 105 – Dados meteorológicos utilizados .....	105
Figura 106 – Potência gerada ao longo do dia no sistema fotovoltaico .....	105
Figura 107 – Potência gerada ao longo do dia no sistema eólico.....	106
Figura 108 – Descrição do sistema híbrido .....	107
Figura 109 – Implementação do sistema híbrido .....	108
Figura 110 – Tensão CA na carga .....	108
Figura 111 – Curvas de potência para carga de 480 W .....	109
Figura 112 – Percentual de carga da bateria para teste.....	109
Figura 113 – Percentual de carga da bateria para o dia médio de dezembro .....	110
Figura 114 – Curvas de potência ao longo do dia no sistema híbrido.....	111
Figura 115 – Cálculo da corrente que fluí pelo diodo .....	123
Figura 116 – Cálculo da tensão térmica .....	123
Figura 117 – Cálculo da corrente de saturação reversa no <i>Simulink</i> .....	123
Figura 118 – Cálculo da diferença de temperatura.....	124
Figura 119 – Cálculo da corrente fotogerada .....	124
Figura 120 – Cálculo da corrente fotogerada nominal .....	124
Figura 121 – Implementação do algoritmo Perturba e Observa para o sistema fotovoltaico.	126
Figura 122 – Implementação do algoritmo Perturba e Observa para o sistema eólico .....	126
Figura 123 – Implementação do algoritmo CI para o sistema fotovoltaico .....	127
Figura 124 – Implementação do algoritmo Condutância Incremental para o sistema eólico.	127
Figura 125 – Implementação do controlador Fuzzy no sistema fotovoltaico.....	127
Figura 126 – Montagem para levantamento de dados do bloco aerodinâmico .....	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do painel de referência .....	40
Tabela 2 – Parâmetros da associação de painéis .....	45
Tabela 3 - Coeficiente de fricção para diferentes terrenos .....	49
Tabela 4 – Classificação dos ventos .....	49
Tabela 5 – Parâmetros do coeficiente de potência .....	55
Tabela 6 – Dados do gerador .....	58
Tabela 7 – Parâmetros dos conversores ligados às fontes .....	72
Tabela 8 – Parâmetros do conversor <i>Boost</i> .....	74
Tabela 9 – Característica do método de Condutância Incremental .....	85
Tabela 10 – Tabela de regras para lógica difusa .....	89
Tabela 11 – Erro apresentado para RNA do sistema fotovoltaico .....	98
Tabela 12 – Erro apresentado para RNA do sistema eólico .....	100
Tabela 13 – Potências obtidas no sistema fotovoltaico .....	102
Tabela 14 – Características dos MPPTs no sistema fotovoltaico .....	103
Tabela 15 – Potências obtidas no sistema eólico .....	103
Tabela 16 – Características dos MPPTs no sistema eólico .....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM	Designação para caracterização da massa do ar
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Condutância Incremental
EMI	Interferência eletromagnética
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LED	Diodo emissor de luz
MPP	Ponto de máxima potência
MPPT	Rastreamento de máxima potência
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
P&O	Perturbar e Observar
PWM	Modulação por largura de pulso
RNA	Redes Neurais Artificiais
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
1. OBJETIVO E ESTRUTURA .....	19
2. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA .....	21
2.1. O Sol e a irradiação solar.....	21
2.2. Breve histórico sobre células solares.....	23
2.3. Física básica do semicondutor.....	25
2.4. Espectro luminoso .....	29
2.5. Modelo elétrico.....	31
2.6. Cálculo das resistências da célula solar.....	38
2.7. Implementação computacional.....	40
2.7.1. Célula solar.....	41
2.7.2. Painel solar.....	42
2.7.3. Associação de painéis.....	45
3. GERAÇÃO EÓLICA .....	46
3.1. Formação dos ventos .....	47
3.2. Breve histórico sobre aerogeradores.....	49
3.3. Tipos de turbinas.....	51
3.4. Princípio de Funcionamento .....	52
3.5. Implementação computacional.....	57
4. CONVERSORES DE TENSÃO .....	62
4.1. Conversor <i>Buck</i> .....	63
4.2. Conversor <i>Boost</i> .....	65
4.3. Conversor <i>Buck-Boost</i> .....	66
4.4. Conversor CC-CA (Inversor) .....	68
4.5. Circuito gerador de modulação por largura de pulso (PWM) .....	70
4.6. Implementação computacional.....	71
5. MAXIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA PRODUZIDA .....	76
5.1. Definição da estratégia de controle.....	77
5.2. Perturbar e Observar (P&O) .....	80
5.2.1. Implementação computacional.....	81

5.3.	Condutância Incremental .....	83
5.3.1.	Implementação computacional .....	85
5.4.	Lógica difusa .....	87
5.4.1.	Implementação computacional .....	90
5.5.	Redes Neurais Artificiais (RNA).....	92
5.5.1.	Implementação computacional .....	95
5.6.	Análise de resultados .....	101
6.	SISTEMA HÍBRIDO.....	107
	CONCLUSÃO.....	112
	REFERÊNCIAS .....	114
	Anexo A – Determinação de $R_s$ e $R_p$ .....	118
	Anexo B – Folha de dados do painel solar .....	120
	Anexo C – Parâmetros de inicialização .....	122
	Anexo D – Representação em blocos das equações da célula solar .....	123
	Anexo E – Folha de dados do motor CC Maxon 353296.....	125
	Anexo F – Descrição em blocos dos algoritmos de controle utilizados.....	126

## INTRODUÇÃO

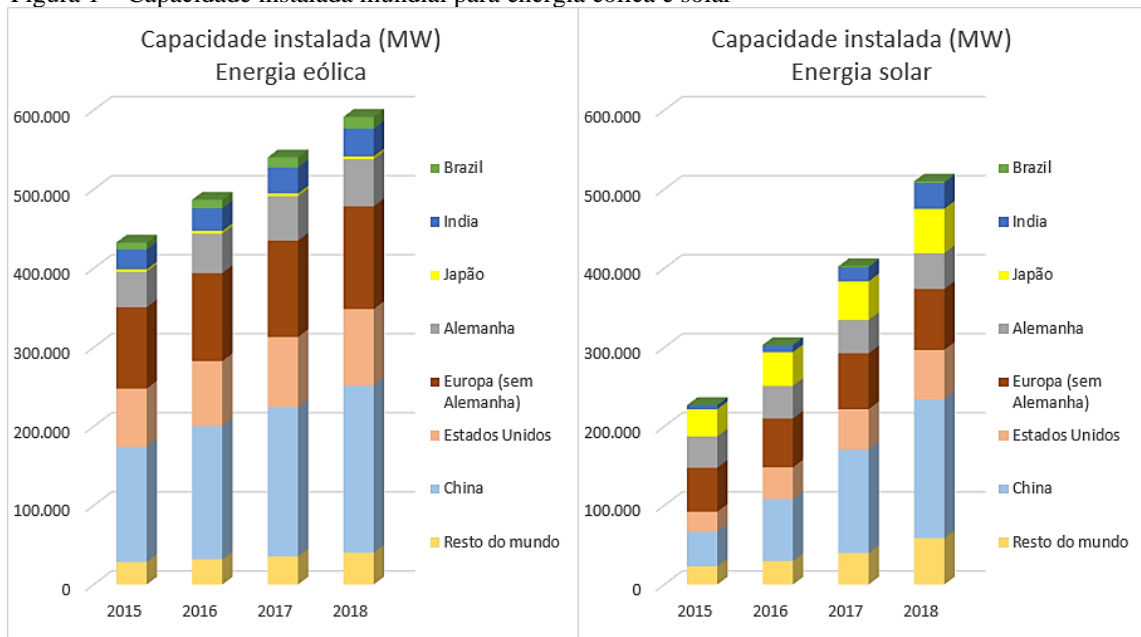
A energia elétrica é um dos produtos mais consumidos e importantes gerados pelo homem nos tempos atuais. Grande parte dos avanços tecnológicos que a humanidade já alcançou se devem a ela e, por seu intermédio, a sociedade pôde desfrutar de itens que trazem conforto, facilitam trabalhos e encurtam distâncias. Com o consumo cada vez maior, a geração de energia torna-se cada vez mais crítica, sendo necessário investimentos nas matrizes energéticas para acompanhar tal crescimento (ALVAREZ e SAIDEL, 1998, p. 1) (SOUZA, GARRASINO e SILVA, 2019, p. 148).

Existem diferentes fontes de energia disponíveis na natureza, as quais podem ser classificadas em dois grupos: renováveis e não renováveis (GOLDEMBERG e LUCON, 2006, p. 9). As primeiras são fontes que podem ser repostas naturalmente, embora não sejam necessariamente inesgotáveis, como a energia eólica, biomassa, energia hídrica e energia solar. Já as fontes não renováveis, são aquelas que utilizam recursos não disponíveis continuamente na natureza, sendo os principais exemplos os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) e a energia nuclear.

No ano de 2019, 72,7% de toda energia elétrica produzida foi proveniente de fontes não renováveis (REN21, 2020, p. 47). Esse elevado consumo tem gerado grandes impactos ao meio em que vivemos, no qual se destaca o aquecimento global devido a emissão de gases de efeito estufa. Para mitigar as consequências geradas por esses gases é necessário reverter esse panorama mundial e alterar a produção de energia elétrica para fontes menos poluentes, intensificando os investimentos em fontes renováveis (GOLDEMBERG e LUCON, 2006, p. 14) (GUPTA, KUMAR e BANSAL, 2015, p. 1367).

A produção energética baseada em fontes limpas como a eólica e a solar vem crescendo no mundo inteiro, com destaque especial para geração fotovoltaica que teve a capacidade instalada mais do que dobrada nos últimos quatro anos, sendo a China o país com maior concentração destas duas formas de conversão (Figura 1).

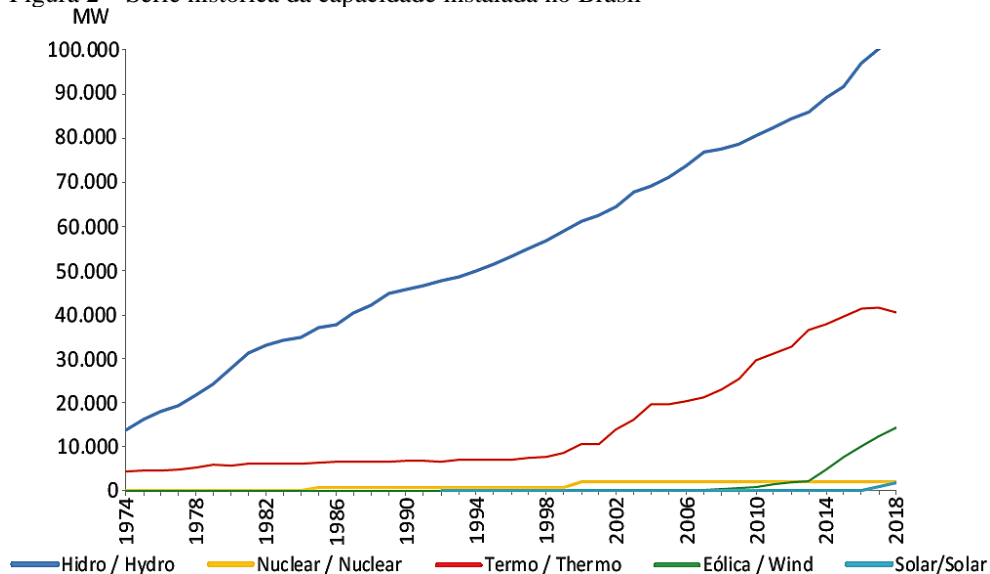
Figura 1 – Capacidade instalada mundial para energia eólica e solar



Fonte: O autor<sup>1</sup>, 2020.

O Brasil tem uma participação muito pequena no uso destas duas formas de geração, mas sua matriz energética é uma das mais renováveis do mundo por conta da grande participação das hidroelétricas, tal como observado na Figura 2 onde é apresentada a série histórica da capacidade energética instalada desde 1974. O baixo investimento nessas formas de geração impede o aproveitamento de um grande potencial natural pois em seu território são obtidas boas taxas de velocidade média anual de ventos e ótimos índices de radiação solar, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 2 – Série histórica da capacidade instalada no Brasil

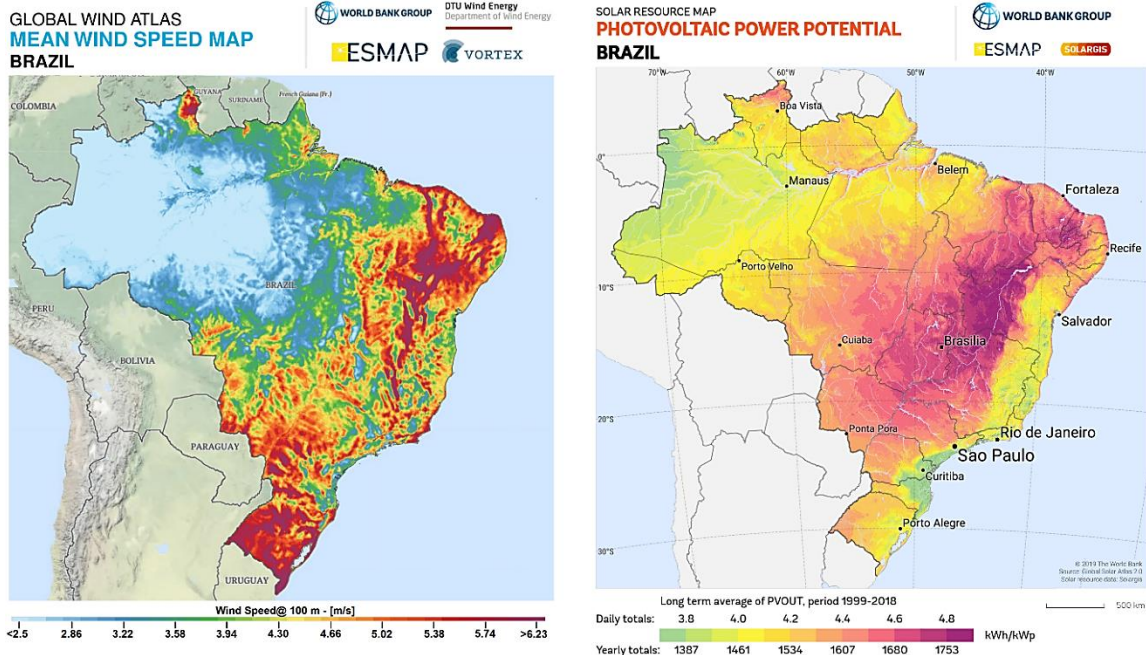


Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019, p. 184.

Dados obtidos em: Global Wind Energy Council (2019), Global Wind Energy Council (2017), International Energy Agency (2016), International Energy Agency (2017), International Energy Agency (2018), International Energy Agency (2020) e Empresa de Pesquisa Energética (2020).



Figura 3 – Média de ventos e potencial solar



Fonte: GLOBAL WIND ATLAS, 2019 e GLOBAL SOLAR ATLAS, 2019.

Como os requisitos necessários para a produção de energia através desses métodos podem ser obtidos de maneira abundante em diversas localidades (raios solares e vento), a variedade de aplicações é enorme e por isso seu uso vem crescendo nos últimos anos. Mesmo quando dentro da cidade, esse tipo de produção se torna uma boa alternativa para reduzir ou suprir de maneira completa o consumo individual, reduzindo a necessidade de produção a partir de outras fontes de energia que geram maiores impactos ambientais negativos.

A microgeração, ou produção distribuída, é um termo utilizado para se referir à geração de energia elétrica ou térmica pelo próprio consumidor, através de equipamentos de pequena escala. Trata-se de um conceito razoavelmente recente, que leva a uma mudança de paradigma importante, provocada pela expansão das energias renováveis, pela introdução de novas tecnologias de informação e comunicação nas redes de baixa tensão, agora ligadas a pequenos equipamentos, bem como a um novo conceito de gestão das redes elétricas adaptadas aos requisitos de descentralização da produção. Não por acaso, tem-se observado ao longo da última década o aumento da ocorrência de trabalhos científicos que investigam aspectos relacionados à geração de energia elétrica por painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas.

Com relação às tecnologias para o aproveitamento dos recursos energéticos renováveis utilizados na microgeração, cita-se as turbinas eólicas de pequena escala, os painéis

fotovoltaicos, os coletores térmicos, as mini-hídricas e as microturbinas. Uma vez que incidem essencialmente em fontes de energia renovável, este sistema de geração melhora o desempenho ambiental do sistema elétrico de maneira geral. Assim, a microgeração possui grandes vantagens em termos não só ambientais, mas também econômicos e tecnológicos, tais como \cite{Moreira:2010}:

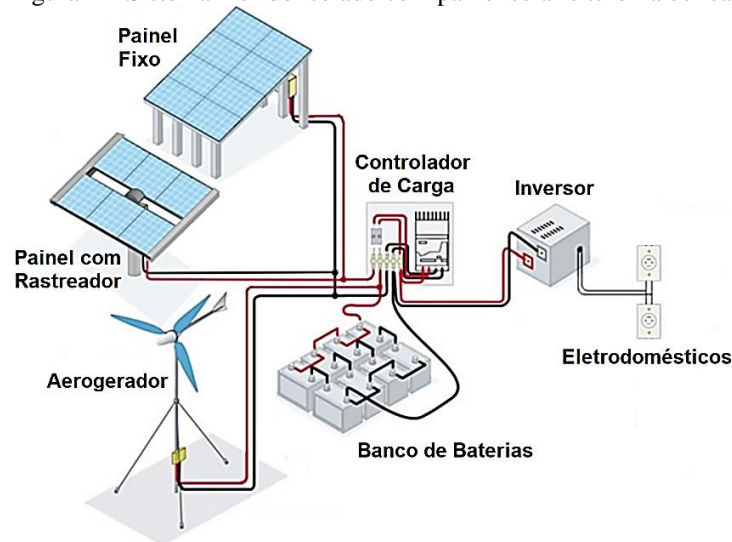
- Equilíbrio de forma dinâmica dos mercados de eletricidade, podendo produzir mais nos períodos de grande demanda e menos quando há pouca demanda;
- Redução das perdas de energia na rede de distribuição elétrica;
- Aumento da confiabilidade do fornecimento de eletricidade aos consumidores;
- Criação de oportunidades para a indústria de bens e equipamentos para o sector elétrico e de empregos associados ao projeto e à instalação de sistemas de microgeração;
- Aumento da autonomia e do poder de decisão dos consumidores individuais e de comunidades locais;
- Em locais onde a rede elétrica tem baixa capacidade ou onde não há rede disponível, sistemas de microgeração podem constituir uma alternativa favorável.

A microgeração realizada por fontes renováveis conta com recursos como vento, irradiação solar e chuvas que nem sempre estão disponíveis de forma apropriada para a geração significativa de energia. Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas híbridos, utilizando diferentes formas de conversão como solar e eólica é de grande importância para que uma fonte possa compensar as falhas de produção da outra, tornando o sistema mais eficiente. Além disso, caso a energia gerada pelas duas fontes seja maior que a utilizada, o excedente pode ser armazenado em baterias, conforme apresentado na Figura 4 onde é exibido um sistema híbrido isolado com sistema de geração eólica solar.

No artigo de Pinto, Szczupak e Torres (2018) é apresentado um estudo de caso que mostra que as fontes eólica e solar conseguem se complementar de forma natural, quando a densidade de radiação solar é maior os ventos são mais fracos e que velocidades de vento mais altas ocorrem durante a noite e madrugada, justamente o período em que sistemas fotovoltaicos não produzem energia. Ainda segundo esses autores, a compensação diária, sazonal e interanual é uma importante característica brasileira e se bem explorada pode evitar o custo econômico e

ambiental de usinas térmicas mais caras e poluentes. Segundo Beyer e Langer (1996, p. 381), essa recorrência complementar é presente em diversas localidades.

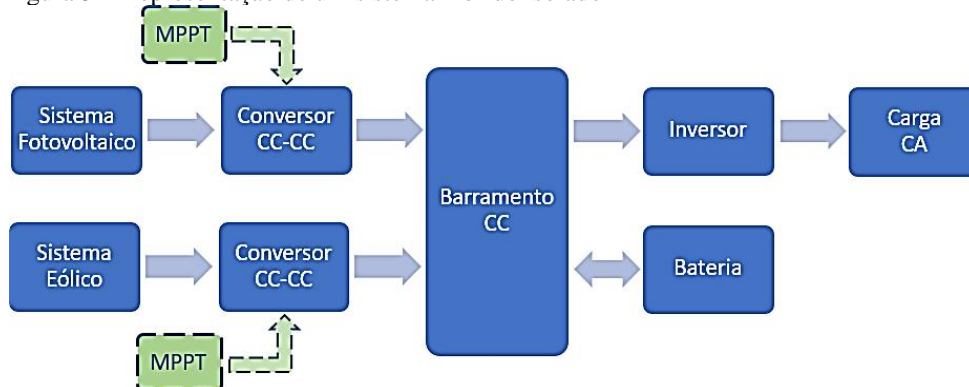
Figura 4 – Sistema híbrido isolado com painel solar e turbina eólica



Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2015, p.8.

Frequentemente instalações com fontes eólicas e solares utilizam sistemas para aperfeiçoar o aproveitamento da energia gerada, maximizando a produção de energia e fazendo com que o sistema opere sempre de forma otimizada. O circuito eletrônico usado para implementar os algoritmos que adequam as características em relação à potência máxima a fim de evitar perda entre a carga e a fonte de energia é chamado de rastreador de ponto de máxima potência (MPPT, do inglês, *Maximum Power Point Tracking*) (VERMA, NEMA, *et al.*, 2016, p. 1019).

Figura 5 – Representação de um sistema híbrido isolado



Fonte: O autor, 2020.

Observando tais necessidades e pontos positivos em relação à geração híbrida utilizando fontes de energia renováveis, o presente trabalho descreve nos capítulos a seguir o

funcionamento de um sistema composto de painéis solares e uma turbina eólica, apresentado de forma geral pelo diagrama em blocos da Figura 5, que conta com bateria para utilização em situações de baixa produção, sistema de busca do ponto de máxima potência de operação para cada uma das fontes e um inversor.

## 1. OBJETIVO E ESTRUTURA

O objetivo do presente trabalho é descrever um modelo computacional para um sistema de microgeração híbrido solar-eólico a ser utilizado em regiões isoladas, desligado da linha de transmissão e simulá-lo em ambiente computacional. O sistema proposto conta com algoritmo de controle e otimização para busca do ponto de máxima potência aplicado através dos conversores CC-CC em cada uma das fontes de energia e um inversor para utilização de aparelhos com corrente alternada (CA). A energia produzida além do necessário é armazenada para utilização posterior em uma bateria, que também contribui para estabilização da tensão no barramento CC.

O emprego de tal modelo permite avaliar o comportamento do sistema em determinado local de maneira prévia, sem a necessidade de instalação, somente com os dados ambientais. Toda implementação computacional foi realizada através do programa de computação científica *MATLAB*, desenvolvido pela empresa *MathWorks*, mais especificamente com a ferramenta de descrição em blocos *Simulink* (THE MATHWORKS, INC., 2020).

O texto está dividido em 6 capítulos seguido da conclusão, sendo o primeiro esse que conta com a descrição do conteúdo do trabalho e o objetivo. Os demais apresentam partes que compõem o sistema híbrido, bem como suas simulações.

O capítulo 2 apresenta a fonte de energia solar, com a descrição da origem do recurso, breve histórico sobre sua utilização, descrição física dos componentes fotovoltaicos, modelo elétrico e sua implementação computacional. Nesse capítulo são realizadas simulações para 3 sistemas diferentes: célula solar, painel solar e um arranjo fotovoltaico composto por 12 painéis solares.

O capítulo 3 tem estrutura semelhante, mas dessa vez apresentando o sistema eólico de geração. Nele é simulada uma turbina eólica com motor de corrente contínua (CC) utilizando o controle do ângulo de *pitch* para limitar a produção em ventos de ordem superior.

No capítulo 4 são apresentados os conversores CC-CC *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost* além do inversor usado no sistema híbrido. Os conversores *Buck* e *Buck-Boost* foram usados para

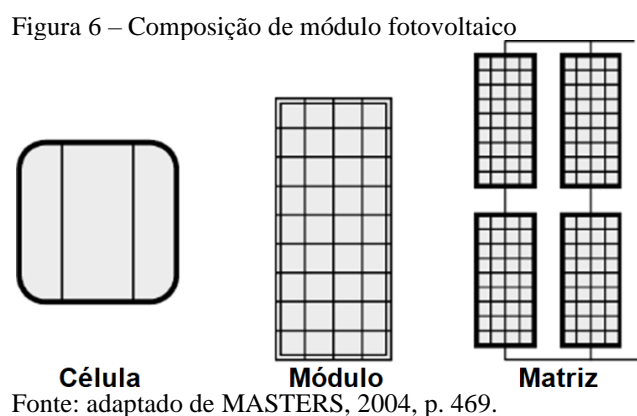
adequar a tensão das fontes ao barramento CC; o *Boost* para elevar a tensão do barramento utilizada pelo inversor, que transforma a tensão CC em CA.

O capítulo 5 apresenta os algoritmos de maximização de potência. Foram comparados os métodos Perturbar e Observar (P&O), Condutância Incremental (Cond. Inc.), Lógica difusa (Fuzzy) e Redes Neurais Artificiais (RNA). Os MPPTs possuem diferentes fundamentos, os dois primeiros são muito populares e simples e outros dois mais sofisticados, ligados à área de *soft computing*. Ainda nesse capítulo, os algoritmos que apresentaram melhores resultados foram comparados com o sistema sem MPPTs, utilizando como base os dados climáticos de um dia médio do mês de dezembro de 2019 para a região de Arraial do Cabo, no Rio de Janeiro.

No capítulo 6 os itens descritos nos capítulos anteriores são conectados, gerando o sistema híbrido de fato com um sistema fotovoltaico formado por 12 painéis e uma turbina eólica, cada um com o MPPT que apresentou o melhor resultado nas simulações, além dos itens necessários para gerar tensão alternada na saída. Nesse capítulo o sistema de microgeração híbrido é testado com os dados ambientais descritos no capítulo anterior.

## 2. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Segundo Masters (2004, p. 445, tradução nossa), “Um material ou dispositivo que é capaz de converter energia contida nos fótons em tensão elétrica e corrente é chamado de fotovoltaico”<sup>2</sup>. As células solares são feitas com este tipo de material no intuito de converter parte da energia irradiada pelo Sol através de ondas eletromagnéticas em energia elétrica. Individualmente as células produzem pouca energia, cerca de 1 W, e por isso são ligadas em arranjos paralelo e/ou série para ampliar sua produção. A Figura 6 apresenta uma matriz de painéis solares formada por módulos, que são feitos com células solares.



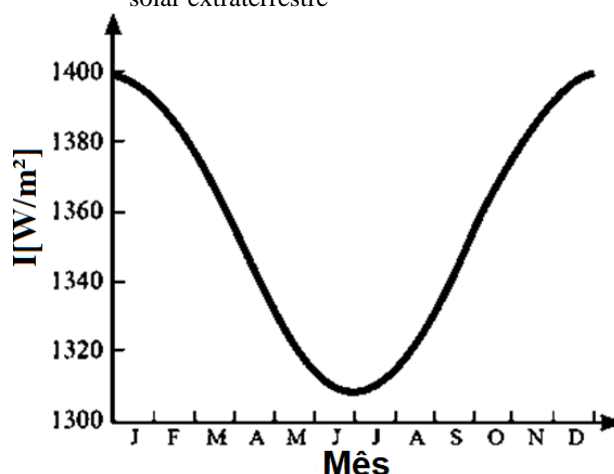
### 2.1. O Sol e a irradiação solar

O Sol é uma gigante esfera de plasma, composta predominantemente por hidrogênio (92%), com massa igual a  $2 \times 10^{30}$  kg e classificada como uma anã amarela. No seu núcleo é produzida uma grande quantidade de energia através de processo termonuclear de conversão de hidrogênio em hélio que gera partículas gama, neutrinos e algumas partículas de energia além de produzir muito calor, tornando a temperatura em sua superfície próxima de 6.000 °C. Essa energia gerada chega à Terra na forma de ondas eletromagnéticas. Após múltiplas colisões inelásticas, as partículas gamas geradas no núcleo do Sol perdem sua energia, de modo que, são emitidos fótons da parte óptica do espectro. Os fótons produzidos demoram cerca de  $10^6$  anos para chegar até a superfície do sol e aproximadamente 8 minutos viajando pelo espaço até chegar a Terra (PAVLOVIC, TSANGRASSOULIS, *et al.*, 2019, p. 4).

<sup>2</sup> O texto em língua estrangeira é: “A material or device that is capable of converting the energy contained in photons of light into an electrical voltage and current is said to be photovoltaic.”

A irradiação solar antes de entrar na atmosfera terrestre possui comprimento de onda entre 0,015 e 1.000  $\mu\text{m}$ . A parte dessa irradiação que entra na atmosfera da Terra é conhecida como *irradiação extraterrestre* e possui comprimento de onda na faixa de 0,704 a 1.000  $\mu\text{m}$ . A intensidade dessa irradiação varia de acordo com a atividade do Sol e a distância entre a Terra e o Sol com valores típicos apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Mudança anual na intensidade da irradiação solar extraterrestre



Fonte: Adaptado de PAVLOVIC, TSANGRASSOULIS, *et al.*, 2019, p. 12.

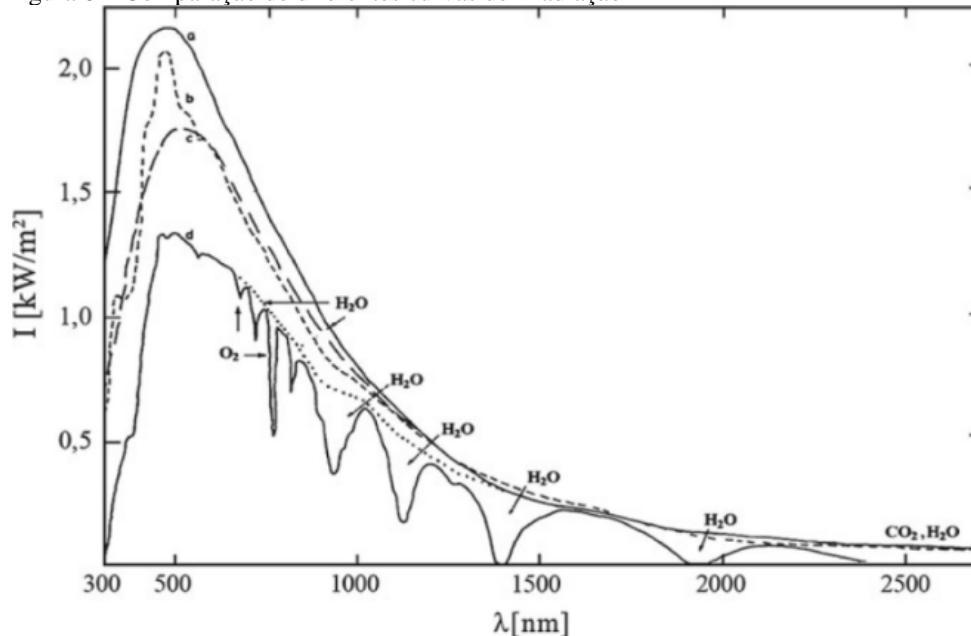
Somente uma parte desse espectro consegue ultrapassar a atmosfera e com isso passa a ser classificada como *irradiação terrestre*. Cerca de 97% do espectro resultante contém comprimentos de onda na faixa de 0,29 a 2,5  $\mu\text{m}$  e 3% acima de 2,5  $\mu\text{m}$ , sendo 55% do espectro eletromagnético descrito como infravermelho, 42% como parte do espectro visível e 3% como ultravioleta.

Todo objeto emite energia radiante em uma quantidade que é função de sua temperatura. Uma forma de descrever a quantidade de irradiação que um objeto emite é comparando-o com uma abstração teórica chamada de *corpo negro*, que é definido tanto como emissor perfeito quanto absorvedor perfeito, dependendo de sua aplicação. Quando usado como emissor perfeito, a irradiação emitida por unidade de área de superfície é maior que um objeto real na mesma temperatura e quando usado como absorvedor perfeito toda a energia é assimilada, sem que qualquer parte seja refletida ou passe através dele (MASTERS, 2004, p. 385).



A Figura 8 apresenta 4 curvas de irradiação diferentes, sendo elas: curva *a* representa a irradiação de um corpo negro na temperatura de 5.727 °C; curva *b* irradiação extraterrestre; curva *c* irradiação de um corpo negro na temperatura de 5.357 °C; curva *d* irradiação terrestre.

Figura 8 – Comparação de diferentes curvas de irradiação



Fonte: McVeigh, J. C., 1983, p. 17.

## 2.2. Breve histórico sobre células solares

O primeiro relato sobre materiais fotovoltaicos é atribuído à Edmund Becquerel (1839), que observou a produção de corrente elétrica ao iluminar eletrodos imersos em uma solução eletrolítica fraca. Quase quatro décadas depois, W. G. Adams e R. E. Day (1876) produziram o que é retratado como o primeiro estudo sobre materiais fotovoltaicos sólidos usando Selênio. Eles fizeram células fotovoltaicas que possibilitaram a criação de instrumentos de medição de intensidade luminosa que, apesar da eficiência baixa, entre 1% e 2%, motivaram novas pesquisas e estudos sobre o assunto, principalmente para a o aperfeiçoamento de técnicas visando melhores resultados em eficiência para a geração de energia elétrica.

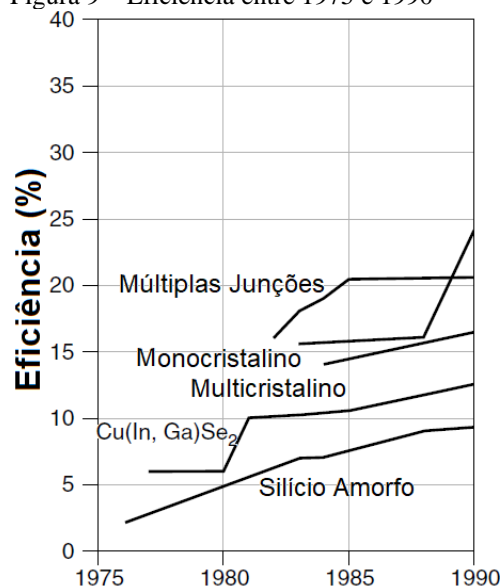
No início do século XX, Albert Einstein (1905) apresentou a explicação teórica do efeito fotoelétrico usando a teoria quântica de Planck, o que lhe concedeu o Prêmio Nobel em 1923. Nessa mesma época Czochralski começou a desenvolver métodos para geração de cristais

perfeitos de silício. Isso foi um divisor de águas não somente para a confecção de células solares, mas também para a criação de dispositivos microeletrônicos (MASTERS, 2004, p. 446). Entre as décadas de 1940 e 1950, ainda com o método criado pelo cientista Czochralski, começaram a ser criadas células solares feitas de Silício monocristalino, que são as mais produzidas e utilizadas até hoje.

Na década de 1950 foram realizadas diversas tentativas de comercialização, mas como o custo era muito alto a ideia acabou não atingindo a grande população e sim projetos espaciais onde o peso relativamente baixo e a confiabilidade desses sistemas pesaram na decisão de incorporá-los à satélites e veículos espaciais. Em 1958 o foi lançado o primeiro satélite a utilizar energia solar. O Vanguard I foi apenas precursor de uma grande variedade de objetos lançados ao espaço que utilizam a energia vinda do Sol para manter seus serviços ativos.

Em 1970 a falta de petróleo causou uma grande crise energética nos EUA, gerando interesses em outras fontes de energia, entre elas a fotovoltaica. Pouco tempo depois, na década de 1980 a eficiência dos painéis aumentou e novos elementos foram descobertos, tornando mais interessante ainda o investimento nesse nicho. A Figura 9 mostra a eficiência das melhores células para diferentes materiais entre 1975 e 1990.

Figura 9 – Eficiência entre 1975 e 1990

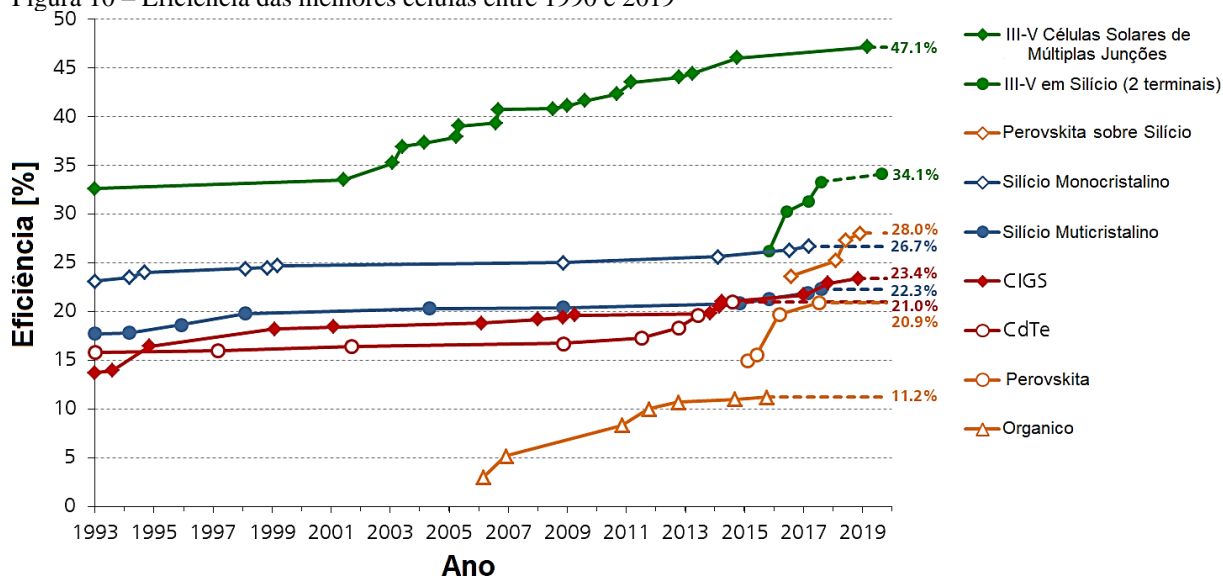


Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004, p.446.

Hoje em dia existe uma gama muito maior de materiais aplicados a esse tipo de produção energética, cada uma com um valor diferente de eficiência como mostra a Figura 10. Diferentes

custos de produção estão associados aos diferentes materiais onde normalmente os menos eficientes são mais baratos, mas que podem ser boas opções dependendo de sua aplicação, especialmente se o local de instalação dispuser de espaço para uma grande quantidade de painéis.

Figura 10 – Eficiência das melhores células entre 1990 e 2019



Fonte: Adaptado de FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS, ISE, 2019, p. 27.

### 2.3. Física básica do semicondutor

Segundo Pavlovic, Tsangrassoulis, et al. (2019, p. 46), os elementos usados como matéria prima de células solares podem ser divididos em três categorias, a saber:

- Inorgânicos:
  - Baseado em silício: silício monocristalino (c-Si), silício policristalino (p-Si), silício amorfo baseado em filme fino (a-Si) e micromorfo (combinação de silício cristalino e amorfo).
  - Sem silício: telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS).
- Orgânico: baseado em polímeros condutores, misturas condutoras ou polímeros condutores nano compostos.

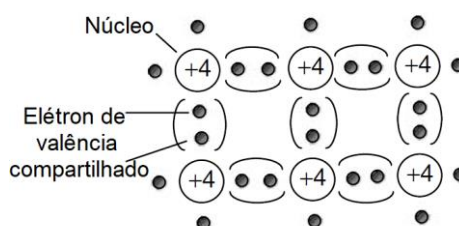
- Híbrido: células solares sensibilizadas a corantes (DSSCs) que utilizam corantes líquidos orgânicos em combinação com dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) imersos em uma solução eletrolítica (catalisador) e que utilizam a estrutura do estado sólido ABX<sub>3</sub> do tipo perovskita como corante em que AB é um elemento orgânico-inorgânico composto como chumbo ou estanho de metilamônio, enquanto X é um halogênio.

O princípio básico de funcionamento de uma célula solar é descrito de maneira breve por Masters (2004) como:

Fótons com comprimento adequado e com energia suficiente colidem com determinados materiais, podem gerar o desprendimento de elétrons. Se for provido um campo elétrico próximo, os elétrons podem seguir de maneira ordenada através de condutores metálicos formando uma corrente elétrica<sup>3</sup> (MASTERS, 2004, p. 445, tradução nossa).

Independente da matéria prima empregada, as células solares são compostas de semicondutores com fabricação semelhante a dispositivos eletrônicos como transistores e diodos. Na temperatura do zero absoluto, os semicondutores são isolantes e conforme a temperatura aumenta, os elétrons ganham energia suficiente para se desprender do núcleo e podendo gerar corrente elétrica. No caso de materiais puros esse processo é muito lento e gera um número extremamente baixo de cargas. A Figura 11 exemplifica uma ligação de cristais de silício puro.

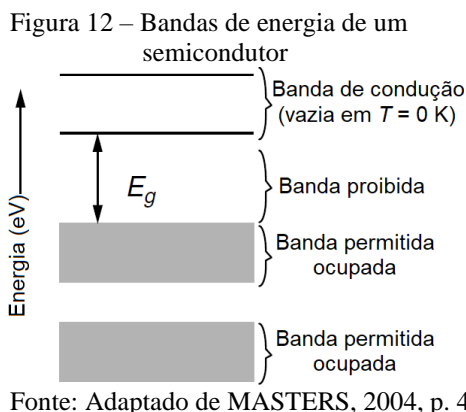
Figura 11 – Representação das ligações covalentes do silício



Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004, p. 449.

Segundo a física quântica, para que um elétron passe da última camada (banda de valência) para a camada de condução é necessário que ele receba uma determinada quantidade de energia. O silício, assim como os demais semicondutores, no zero absoluto, está com a banda de condução vazia (Figura 12) e em temperatura ambiente com pouquíssimas portadoras.

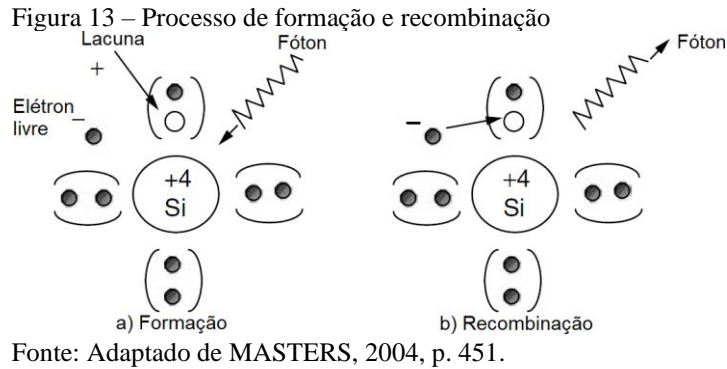
<sup>3</sup> O texto em língua estrangeira é: A photon with short enough wavelength and high enough energy can cause an electron in a photovoltaic material to break free of the atom that holds it. If a nearby electric field is provided, those electrons can be swept toward a metallic contact where they can emerge as an electric current.



Os espaços entre as bandas de energia são chamados de bandas proibidas, onde não existe nenhuma partícula subatômica, sendo o espaço entre a última banda e a banda de condução o mais relevante para essa análise. Para que um elétron passe através da banda proibida e chegue na banda de condução é necessário que ele receba uma determinada quantidade de energia, que é proporcional ao espaço entre as bandas, definida como  $E_g$  e chamada de energia de gap. A unidade dessa grandeza é o elétron-volt (eV) que é a energia que um elétron recebe para que aumente em 1 V, sendo  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$  (MASTERS, 2004, p. 450) (HALLIDAY, RESNICK e JEARL, 2016, p. 860).

Para o silício, a energia de gap é 1,12 eV. Isso significa que o elétron precisa receber essa quantidade de energia para se libertar da força eletrostática que o prende ao núcleo. Nesse caso, quando um fóton com mais de 1,12 eV é absorvido, um elétron passa da camada de valência para a banda de condução e a última camada deixa de ter 4 elétrons para ficar com 3. Esse processo é denominado formação, e a ausência desse elétron cria um espaço denominado lacuna. Quando a lacuna é preenchida por um elétron, a energia que antes foi absorvida será liberada na mesma quantidade, gerando um fóton. Esse processo é chamado de recombinação e é a base dos diodos emissores de luz (LEDs). Os dois processos descritos anteriormente estão representados na Figura 13.

Nessa forma apresentada, o fóton irá gerar um elétron livre e uma lacuna e em seguida ocorrerá o retorno desse elétron para a lacuna, que é um evento indesejado para as células solares, pois não será gerado fluxo de elétrons. Para evitar a recombinação é necessário que os elétrons sejam trocados de forma constante com os átomos adjacentes, criando assim uma corrente elétrica.



Para obter esse resultado é necessário a criação de um campo elétrico no interior do semicondutor, dividindo o cristal em duas regiões. Esse processo de alteração das características químicas é chamado de dopagem, na qual são inseridas pequenas quantidades de impurezas, de forma controlada, para facilitar o deslocamento de elétrons. Essas impurezas são elementos de colunas próximas do material utilizado, no caso do silício são utilizados átomos da coluna III e da coluna V da tabela periódica, fazendo com que o material fique com mais lacunas (menos negativo – tipo *p*) ou com mais elétrons (mais negativo – tipo *n*), respectivamente. O átomo inserido no material do tipo *n* também é chamado de doador de elétrons (Figura 14) e o átomo inserido no material do tipo *p* é chamado de aceitador de elétrons (Figura 15) (MASTERS, 2004, p. 456) (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2013, p. 5).

Figura 14 – Material do tipo n, doador de elétrons

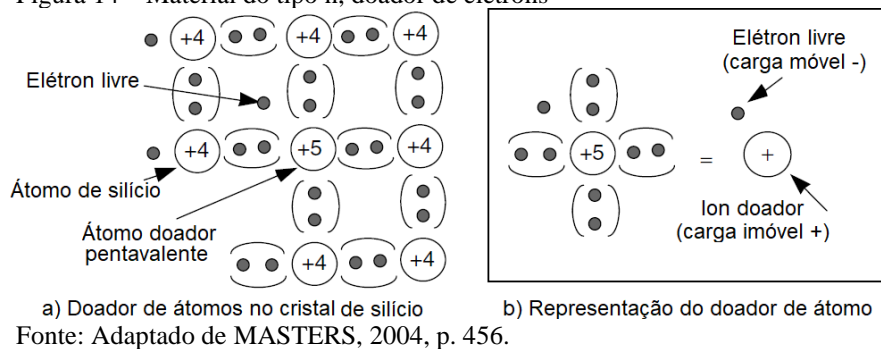
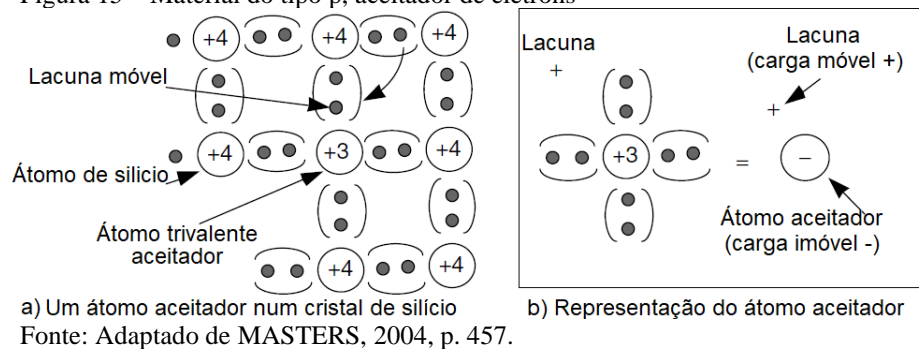
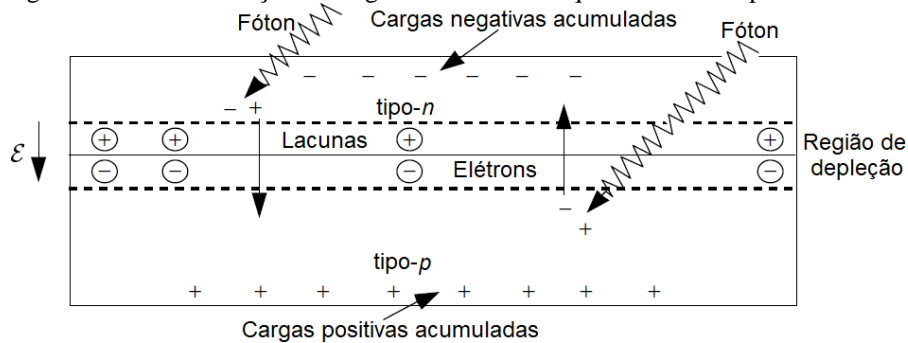


Figura 15 – Material do tipo p, aceitador de elétrons



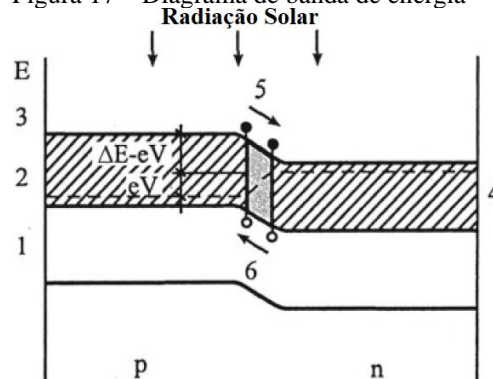
Durante a exposição a luz, à medida em que os fótons são absorvidos, pares lacuna-elétron podem ser formados. Quando as cargas móveis alcançarem a vizinhança da junção, o campo elétrico na região camada de depleção empurrará as lacunas para o lado  $p$  e empurrará os elétrons para o lado  $n$  (Figura 16). Como resultado de tal movimento, nas extremidades da célula solar será gerada uma diferença de potencial que pode ser representada através do diagrama de banda de energia na Figura 17.

Figura 16 – Movimentação de cargas na célula solar quando excitada por fótons



Fonte: MASTERS, 2004, p. 460.

Figura 17 – Diagrama de banda de energia



Legenda: (1) zona de valência, (2) área restrita, (3) zona condutora, (4) nível de Fermi, (5) movimento de elétrons, (6) movimento de lacunas

Fonte: Adaptado de PAVLOVIC, TSANGRASSOULIS, *et al.*, 2019, p. 47.

## 2.4. Espectro luminoso

Conforme apresentado na Figura 8, o espectro luminoso é extenso e possui diferentes comprimentos de onda. Apesar de amplo, nem todo espectro possui energia suficiente para

gerar elétrons livres. Como já foi dito, no caso do silício é necessário que o fóton tenha energia igual ou maior que 1,12 eV. Para determinar em quais comprimentos de onda o elemento possuem essa capacidade, pode-se usar as Equações 1 e 2 a seguir, que relacionam energia com o comprimento de onda.

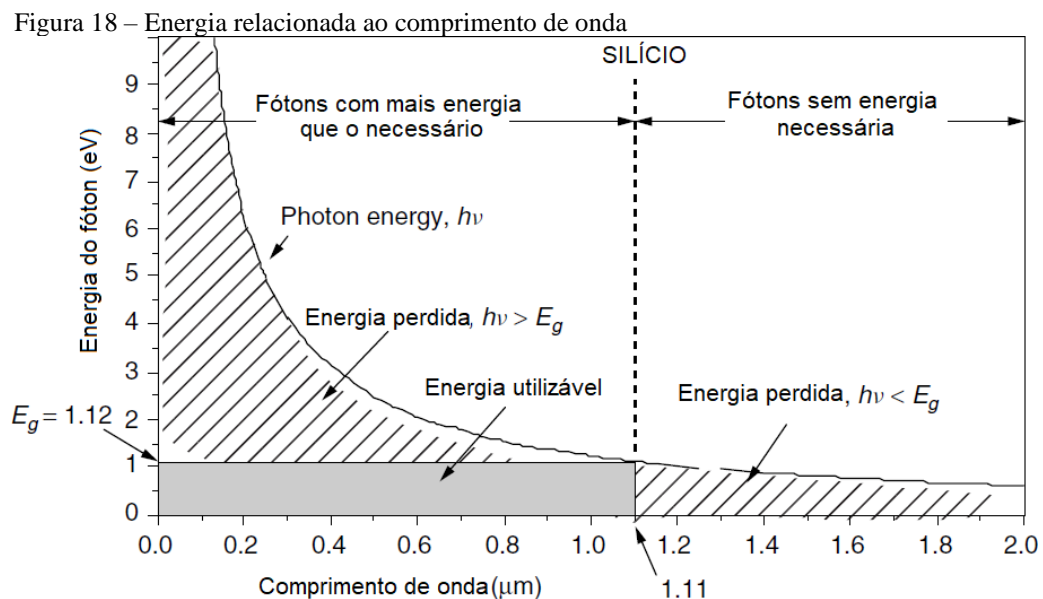
$$c = \lambda v \Rightarrow v = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Nas quais  $c$  é a velocidade da luz ( $3 \cdot 10^8$  m/s),  $v$  a frequência em Hertz,  $\lambda$  é o comprimento de onda em metros,  $E$  a energia do fóton,  $h$  a constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  J-s). Usando as equações acima é possível chegar à Equação 3 e com isso determinar o comprimento de onda máximo para o desprendimento de fótons.

$$\lambda \leq \frac{hc}{E} \quad (3)$$

Substituindo valores, é possível concluir que comprimentos de onda maiores que  $1,11 \mu\text{m}$  não possuem energia suficiente para desprender elétrons. A Figura 18 apresenta a energia contida em fótons com diferentes comprimentos de onda e destaca a faixa aproveitável para uma célula produzida com silício. É interessante observar que existe uma parte do espectro que possui energia maior que o necessário para excitar o material. Essa energia “extra” é dissipada pela célula solar pois um fóton pode desprender somente um elétron.

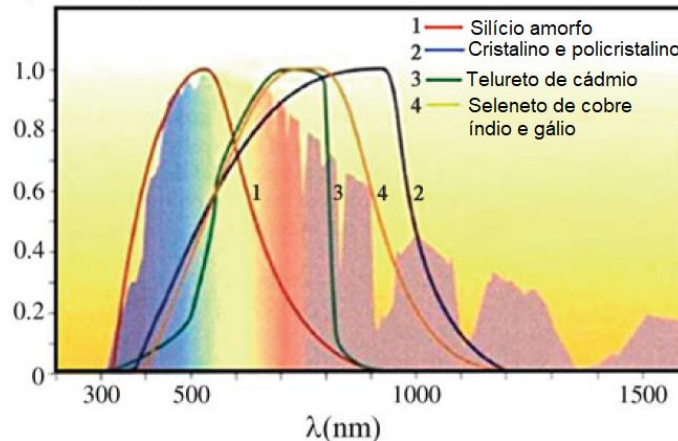


Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004, p. 453.



Cada material necessita de uma quantidade de energia diferente para realizar esse processo. A Figura 19 apresenta a sensibilidade de diferentes materiais que são usados para a produção de células solares.

Figura 19 – Sensibilidade espectral para diferentes materiais  $S(A/Wcm^2)$



Fonte: Adaptado de RPS SOLAR SOLUTIONS, 2018, p. 8.

## 2.5. Modelo elétrico

O circuito elétrico equivalente de um painel ou célula solar utiliza alguns parâmetros que são obtidos em testes laboratoriais e que normalmente são disponibilizados pelo fabricante em folhas de dados relativas aos painéis produzidos. Os testes são realizados sob condições normais de teste (STC, do inglês *Standard Test Conditions*) ou temperatura nominal da célula operacional (NOCT, do inglês *Nominal Operating Cell Temperature*) e ambos os métodos são usados para indicar o desempenho do módulo solar sob condições realistas de funcionamento.

Nesses testes a densidade de irradiação solar é de  $1000 \text{ W/m}^2$ , massa do ar em AM 1,5, temperatura do módulo solar em  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e vento com velocidade de  $1 \text{ m/s}$ . Os parâmetros apresentados nas folhas de dados necessários para descrição do modelo elétrico são:

$P_{max}$  – Potência máxima;

$V_{max}$  – Tensão para máxima potência;

$I_{max}$  – Corrente para máxima potência;

$V_{oc}$  – Tensão de circuito aberto;

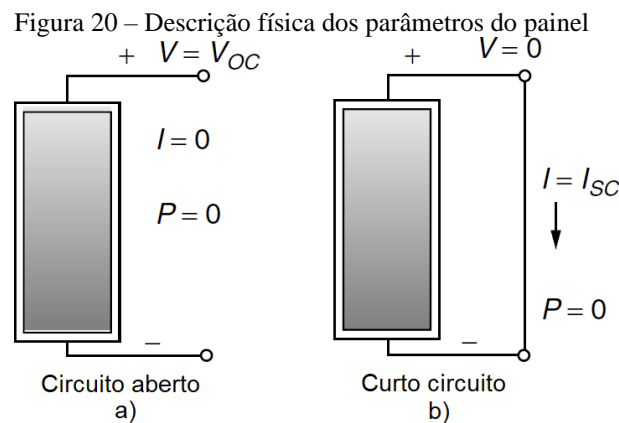
$I_{sc}$  – Corrente de curto-circuito;

$K_V$  – Coeficiente de temperatura para tensão de circuito aberto;

$K_I$  – Coeficiente de temperatura para corrente de curto-circuito;

$N_S$  – Número de células em série.

No momento em que ocorre a tensão de circuito aberto, a tensão atinge seu valor máximo e a corrente é nula. No momento em que corrente de curto-circuito é obtida, a corrente atinge seu valor máximo, mas com tensão igual a zero. Em ambos os casos a potência fornecida pelo módulo é nula. As duas situações são apresentadas na Figura 20.



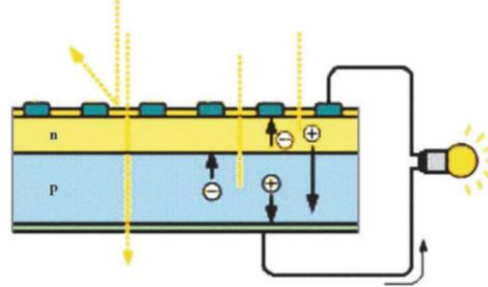
Legenda: (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e (b) corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ).

Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004, p. 473.

Caso os valores  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  sejam retirados da folha de dados de um painel e usados para elaboração do modelo da célula que constitui esse painel, os valores deverão ser escalonados de acordo com a quantidade de células em série e em paralelo. Nesse caso a tensão  $V_{oc}$  será medida em cima de todas as células que estão em série e deverá ser usado como  $V_{oc}/N_S$ . Para a corrente de curto  $I_{sc}$ , esse valor deverá ser dividido pela quantidade de módulos em paralelo se tornando  $I_{sc}/N_p$ . Como o painel que usado nesse trabalho possui 36 células em série e nenhuma em paralelo, o termo  $N_p$  será negligenciado.

Quando uma carga é conectada aos terminais da célula solar, um circuito elétrico fechado é formado. A Figura 21 ilustra essa situação, na qual uma lâmpada é conectada e os pares lacuna-elétron que foram gerados por conta da excitação solar começam a se movimentar gerando uma corrente elétrica.

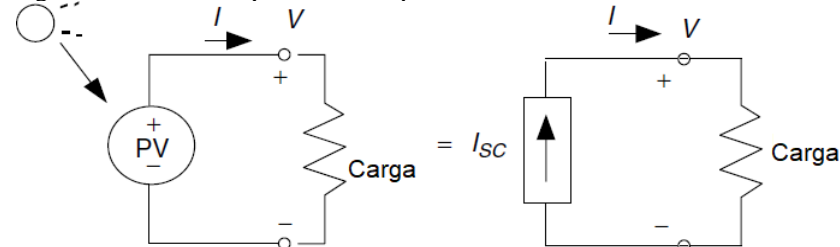
Figura 21 – Célula solar em circuito elétrico



Fonte: PAVLOVIC, TSANGRASSOULIS, *et al.*, 2019, p. 47.

A Figura 22 apresenta o esquema elétrico equivalente dessa ligação. Nela, a célula solar foi substituída por uma fonte de corrente controlada, que é uma representação razoável para o equivalente elétrico tendo em vista que quanto maior a intensidade da irradiação solar, maior será a corrente produzida. Essa correlação preliminar estabelece uma relação entre a fluxo de elétrons e a intensidade dos raios solares, mas está longe de ser uma boa representação pois não retrata de maneira adequada algumas limitações por conta dos materiais envolvidos e de perdas associadas.

Figura 22 – Modelo equivalente simplificado



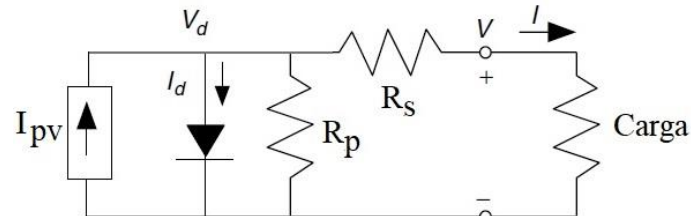
Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004, p. 461.

Como foi visto na descrição física da célula solar, sua construção é feita usando semicondutores que passam pelo processo de dopagem, formando materiais do tipo *p* e do tipo *n*, unidos um seguido do outro. Os efeitos causados pela junção desses dois materiais podem ser representados por um componente eletrônico que possui exatamente a mesma construção física, um diodo real.

Para representar as perdas do dispositivo fotovoltaico prático são utilizados dois resistores,  $R_p$  e  $R_s$ . A resistência em série ( $R_s$ ) tem influência maior quando o dispositivo opera na região de fonte de tensão e a resistência paralela ( $R_p$ ) com maior influência na região de operação como fonte de corrente (SUMATHI, KUMAR e SUREKHA, 2015, p. 72).

Inserindo todos esses componentes obtém-se um modelo mais representativo da célula solar, normalmente chamado de modelo completo ou modelo com um diodo, que é amplamente usado para simular o comportamento destes dispositivos (Figura 23).

Figura 23 – Circuito equivalente completo



Fonte: adaptado de MASTERS, 2004, p. 503.

Analisando o circuito da Figura 23, pode-se descrever a corrente  $I$  fornecida à carga a partir das demais correntes do circuito, conforme Equação 4.

$$I = I_{pv} - I_d - I_{Rp} \quad (4)$$

Onde:

$I$  é a corrente que a célula fornece à carga em seus terminais de saída;

$I_{pv}$  é a corrente fotogerada;

$I_d$  é a corrente que passa pelo diodo existente por conta da junção p-n;

$I_{Rp}$  é a corrente que flui pelo resistor  $R_p$ .

A Equação 5, descrita por Masters (2004, p. 458) e Boylestad (2013, p. 13), apresenta o comportamento de  $I_d$  nas regiões de polarização direta e reversa. Sua curva característica é exibida na Figura 24.

$$I_d = I_0(e^{qV_d/akT} - 1) \quad (5)$$

Na qual:

$I_0$  é a corrente de saturação reversa;

$q$  é a carga do elétron;

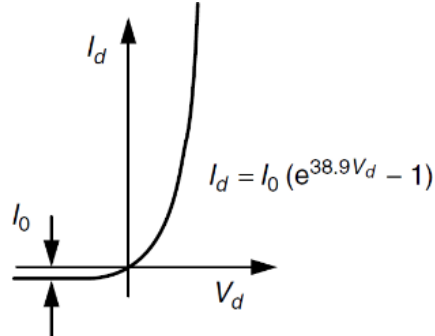
$V_d$  é a tensão no diodo

$\alpha$  é a constante de idealidade relacionada ao material usado;

$K$  é a constante de Boltzman;

$T$  é a temperatura ambiente.

Figura 24 – Curva característica I-V de um diodo



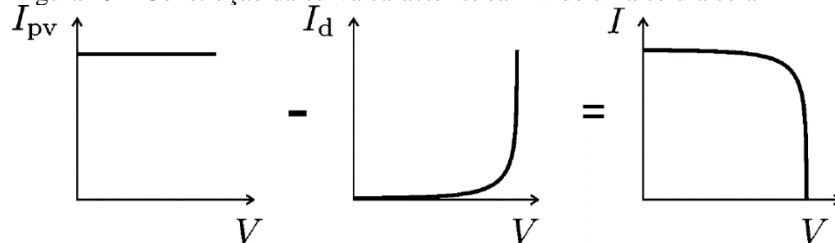
Fonte: MASTERS, 2004, p. 458.

As constantes físicas e a temperatura ambiente presentes na Equação 5 podem ser agrupadas em uma componente, denominada tensão térmica de junção e denotada por  $V_t$ . Em temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ , seu valor corresponde a aproximadamente 26 mV, conforme apresentado na Equação 6 junto a unidade que a representa.

$$V_t = \frac{kT}{q} \cong 26\text{mV} \rightarrow \frac{[\text{J/K}][\text{K}]}{[\text{C}]} = [\text{V}] \quad (6)$$

A curva característica de uma célula solar desconsiderando-se as perdas associadas aos resistores é apresentada na Figura 25. Como a corrente  $I_{pv}$  é constante, quando mantida temperatura e densidade de irradiação, o gráfico se mantém plano até que a corrente  $I_d$  passa a aumentar e, por estar subtraindo na equação geral, a corrente  $I$  diminui rapidamente.

Figura 25 – Construção da curva característica I-V de uma célula solar



Fonte: VILLALVA, GAZOLI e FILHO, 2009, p. 1200.

A corrente de saturação reversa  $I_0$  pode ser calculada através de parâmetros fornecidos nas folhas de dados do painel solar, usando a corrente de curto circuito  $I_{SC}$  e a tensão de circuito aberto  $V_{OC}$ , que são apresentados com o índice  $n$  na Equação 7 para representar valores nominais.

$$I_0 = \frac{I_{sc,n}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc,n}}{\alpha \cdot N_s \cdot k \cdot T}\right)} - 1} \quad (7)$$

Esse parâmetro é fortemente dependente de variações de temperatura. Segundo Sumathi, Kumar e Surekha (2015), o efeito de tais alterações é linear e modifica as características de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito. Para ajustar a Equação 7, os coeficientes de tensão e corrente por temperatura,  $K_V$  e  $K_I$ , podem ser inseridos conforme apresentado na Equação 8.

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta_T}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc,n} + K_V \Delta_T}{\alpha \cdot N_s \cdot k \cdot T}\right)} - 1} \quad (8)$$

Na qual  $\Delta_T$  representa a diferença entre a temperatura local e a nominal utilizada nos testes da folha de dados.

$$\Delta_T = T_{local} - T_{nominal} \quad (9)$$

Ainda descrevendo a parcela relativa à corrente que flui pelo diodo, a tensão sobre os terminais do mesmo ( $V_d$ ) pode ser definida em função da tensão de saída e da queda de tensão sobre  $R_s$ , conforme Equação 10.

$$V_d = V - I \cdot R_s \quad (10)$$

O terceiro termo, a corrente  $I_{Rp}$ , pode ser expressa conforme Equação 11.

$$I_{Rp} = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (11)$$

Por último, a corrente  $I_{pv}$  é a componente principal que relaciona a corrente gerada no circuito com a irradiação incidente na célula. Segundo (SUMATHI, KUMAR e SUREKHA, 2015), ela pode ser expressa através das Equações 12 e 13.

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta_T) \frac{G}{G_n} \quad (12)$$

$$I_{pv,n} = \frac{(R_p + R_s)}{R_p} I_{sc,n} \quad (13)$$

Nestas,  $G$  é a densidade de irradiação que atinge o painel e  $G_n$  o valor relativo à irradiação nominal usada para obter os parâmetros apresentados na folha de dados, ambas usualmente expressas em  $W/m^2$ .  $I_{pv,n}$  é a corrente fotogerada durante o teste realizado com condições ambientais controladas, tendo em vista que a medida de  $I_{sc,n}$  sofreu perdas relativas

às resistências intrínsecas do material (Equação 13). A Equação 12 também leva em conta a variação de corrente por conta da diferença entre a temperatura da célula e a temperatura nominal de 25°C.

Levando em conta todas as alterações apresentadas, a Equação 4 pode ser reescrita de forma mais explícita conforme Equação 14.

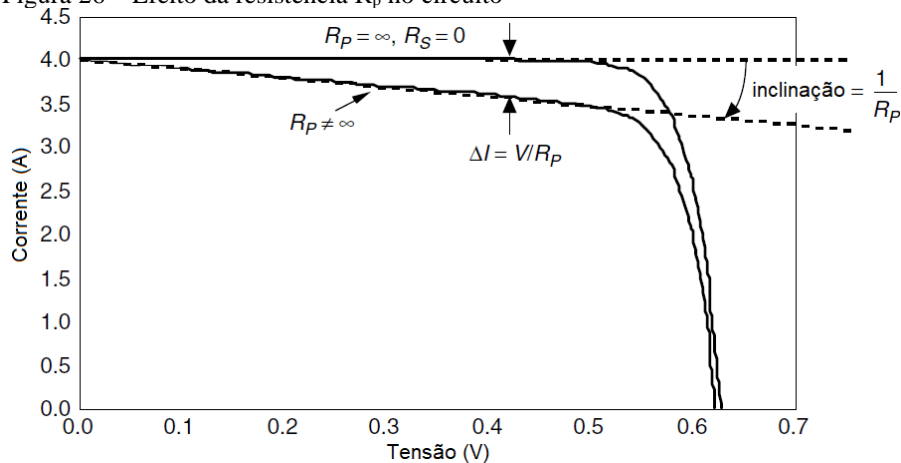
$$I = \left( \frac{(R_p + R_s)}{R_p} I_{sc,n} + K_I \Delta T \right) \frac{G}{G_n} - I_0 \left( e^{qV - I \cdot R_s / akT} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (14)$$

Na qual  $I_0$  pode ser obtida através da Equação 8, apresentada abaixo:

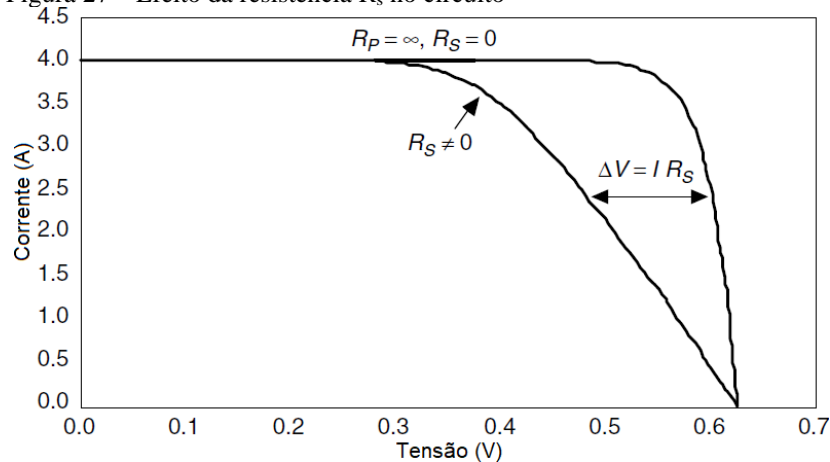
$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{e^{\left( \frac{q \cdot V_{oc,n} + K_V \Delta T}{\alpha \cdot N_s \cdot k \cdot T} \right)} - 1}$$

Essas equações representam o circuito real de uma célula solar. O efeito das resistências  $R_p$  e  $R_s$  altera de maneira significativa a curva corrente-tensão apresentada na Figura 25. A Figura 26 faz uma comparação entre uma curva onde não há influência das resistências e outra na qual é atribuído um valor finito para resistência  $R_p$ . Nesse caso é possível observar que quanto menor a resistência  $R_p$ , maior será o declive da região plana. Uma análise semelhante é feita para resistência  $R_s$  na Figura 27, mas dessa vez quanto maior for o valor de  $R_s$ , maior será sua influência no circuito.

Figura 26 – Efeito da resistência  $R_p$  no circuito



Fonte: MASTERS, 2004, p. 465.

Figura 27 – Efeito da resistência  $R_s$  no circuito

Fonte: MASTERS, 2004, p. 466.

## 2.6. Cálculo das resistências da célula solar

As resistências intrínsecas do painel ou célula são extremamente relevantes para elaboração de um modelo mais preciso. Esses parâmetros geralmente não são disponibilizados pelos fabricantes, mas podem ser calculados através de um processo iterativo usando o método de Newton-Raphson para calcular a curva de corrente e tensão de um determinado par de resistências candidato. Em seguida, o valor de máxima potência obtido é comparando com a potência experimental ( $P_{\max,e}$ ) apresentada na folha de dados para o ponto MPP. A cada iteração os valores de  $R_s$  e  $R_p$  são alterados e os cálculos são refeitos.

A metodologia usada para realizar o levantamento dessas resistências é descrita através do fluxograma exibido na Figura 28. O algoritmo implementado neste trabalho com esta finalidade está disponível no Anexo A – Determinação de  $R_s$  e  $R_p$ .

Ao final do processo é encontrado o par de resistências que satisfaz a equação característica do painel (Equação 14), pois existe somente uma possibilidade que corresponde ao valor medido experimentalmente (HABBATI BELLIA, 2014, p. 58) (SUMATHI, KUMAR e SUREKHA, 2015, p. 75). A partir da equação que descreve a potência no ponto máximo (Equação 15) é possível chegar na Equação 16, que apresenta a relação das resistências com o ponto de máxima potência.



Figura 28 – Fluxograma para determinação de  $R_s$  e  $R_p$



Fonte: O autor, 2020.

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} = P_{max,e} \quad (15)$$

$$P_{max} = V_{max} \times \left\{ I_{pv} - I_0 \left[ e^{\frac{q(V_{max} - I_{max} \cdot R_s)}{\alpha k T N_s}} - 1 \right] - \frac{V_{max} - I_{max} \cdot R_s}{R_p} \right\} = P_{max,e}$$

$$R_p = \frac{V_{max} \cdot (V_{max} + I_{max} \cdot R_s)}{V_{max} I_{pv} - V_{max} I_0 \left[ e^{\frac{q(V_{max} - I_{max} \cdot R_s)}{\alpha k T N_s}} \right] + V_{max} I_{pv} - P_{max,e}} \quad (16)$$

Pode-se observar na Equação 16 que o valor de uma resistência é dependente da outra. Na aplicação do método são realizados teste com diversos valores de resistências e para isso é necessário definir um valor de inicialização para  $R_s$  e  $R_p$ . O valor inicial de  $R_s$  pode ser zero, pois a cada iteração ele será incrementado com pequenos valores e seu valor geralmente não é grande. A inicialização de  $R_p$  pode ser realizada através da Equação 17 que define o valor mínimo de  $R_p$  e tende a reduzir a quantidade de tentativas realizadas

$$R_{pmin} = \frac{V_{max}}{I_{sc} - I_{max}} - \frac{V_{oc} - V_{max}}{I_{max}} \quad (17)$$

## 2.7. Implementação computacional

A seguir são apresentadas as implementações de circuitos para emulação em ambiente computacional de uma célula solar, um painel fotovoltaico composto por essas células e um sistema composto pela associação de painéis. O painel solar usado como referência nesse trabalho é o YL020P-17b 1/7 da Yingli Solar de 20 W, disponível no laboratório de Controle e Automação da UERJ e que tem características apresentadas no Anexo B – Folha de dados do painel solar. Seus principais atributos são descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do painel de referência

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência máxima	20 W
Eficiência	11,50 %
Tensão no ponto máximo	16,60 V
Corrente no ponto máximo	1,20 A
Tensão de circuito aberto	21,4 V
Corrente de curto-circuito	1,31 A
Coeficiente de temperatura para tensão de circuito aberto	-0,37 %/C
Coeficiente de temperatura para corrente de curto-circuito	0,06 %/C
Quantidade de células em série	36
Material das células	Silício multicristalino
Resistência série (calculada)	1,328 $\Omega$
Resistência paralelo (calculada)	866,734 $\Omega$

Fonte: O autor, 2020.

Os coeficientes de temperatura deste modelo são apresentados pelo fabricante em %/C, mas no desenvolvimento do modelo elétrico as unidades usadas foram V/°C e A/°C. O valor percentual é referenciado ao parâmetro de tensão de circuito aberto ou corrente de curto e a adequação necessária para encontrar a variação em cada parâmetro é apresentada nas Equações 18 e 19.

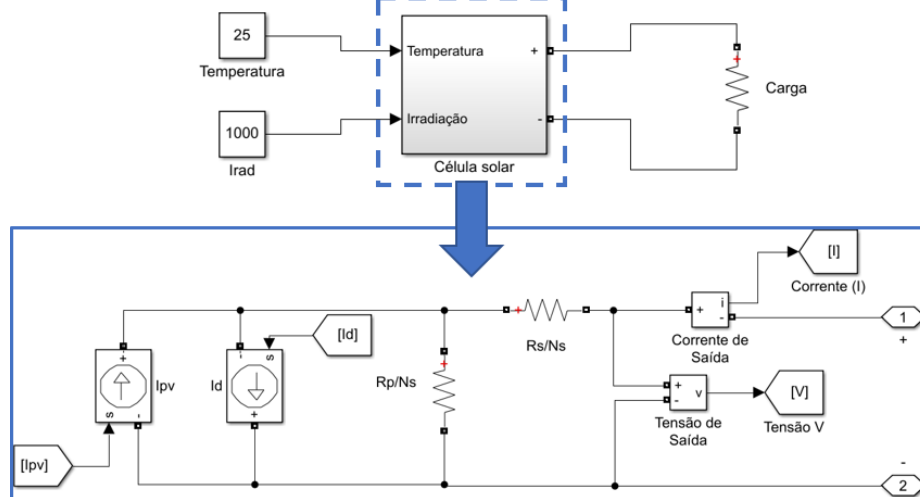
$$\Delta V = V_{oc} \cdot \frac{\Delta T \cdot K_v}{100} \quad (18)$$

$$\Delta I = I_{sc} \cdot \frac{\Delta T \cdot K_i}{100} \quad (19)$$

### 2.7.1. Célula solar

O modelo da célula solar é representado pelo módulo “Célula solar” da Figura 29. Ele tem como entrada duas condições ambientais, temperatura e irradiação, e como saída dois terminais que representam os conectores positivo e negativo da célula. Dentro dele está o circuito equivalente do modelo elétrico completo da célula solar, além dos blocos que descrevem as funções necessárias para implementação das correntes mandatórias do circuito. Os parâmetros utilizados nas simulações estão descritos no Anexo C – Parâmetros de inicialização, e os blocos internos que descrevem as correntes são apresentados na integra no Anexo D – Representação em blocos das equações da célula solar.

Figura 29 – Modelo elétrico de uma célula solar no Simulink



Fonte: O autor, 2020.

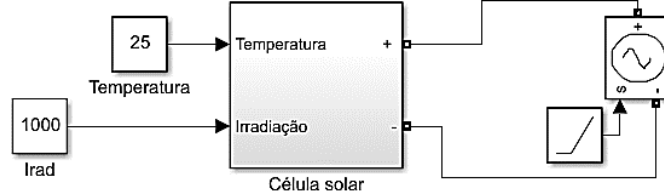
As resistências usadas nesse modelo não são as encontradas através do processo iterativo, pois elas foram calculadas para o painel e não para a célula que o compõe. Os valores foram escalonados, dividindo o valor encontrado pela quantidade de células em série, de forma semelhante com o que é apresentado por Sumathi, Kumar e Surekha (2015, p. 75) e descrito na Equação 20.

$$R_{\text{painel}} = \frac{R_{\text{célula}}}{N_{\text{paralelo}}} \cdot N_{\text{série}} \quad (20)$$

De posse dos dados necessários, é possível verificar o comportamento da célula solar para diversas condições de operação, alterando a carga e os valores das entradas de temperatura e densidade de irradiação solar. Para traçar a curva característica de tensão por corrente é

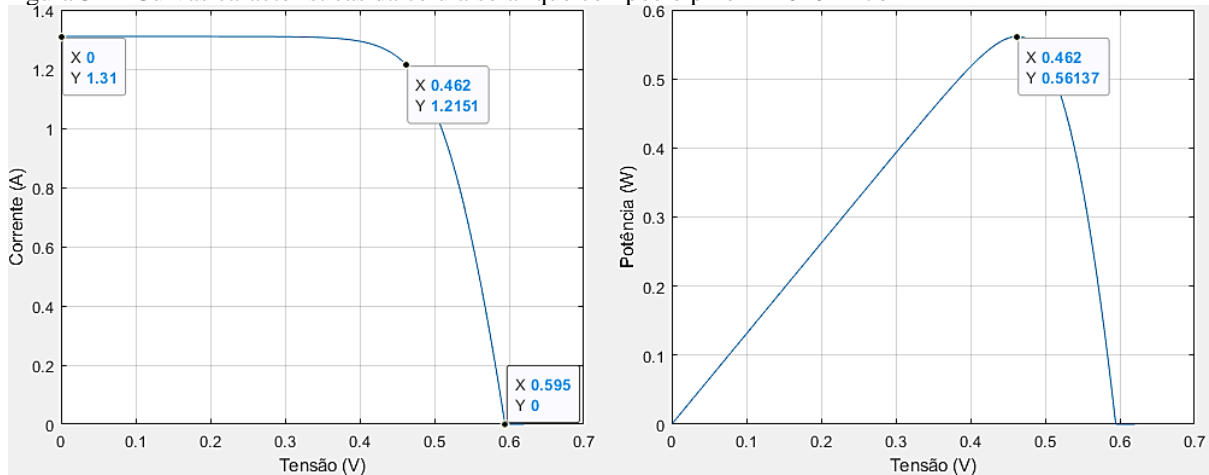
necessário inserir uma fonte de tensão CC com os valores desejados. A alteração realizada para testes é exibida na Figura 30 e as curvas características da célula solar para temperatura de 25°C e densidade de irradiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup> na Figura 31.

Figura 30 – Blocos internos para teste da célula solar



Fonte: O autor, 2020.

Figura 31 – Curvas características da célula solar que compõe o painel YL020P-17b



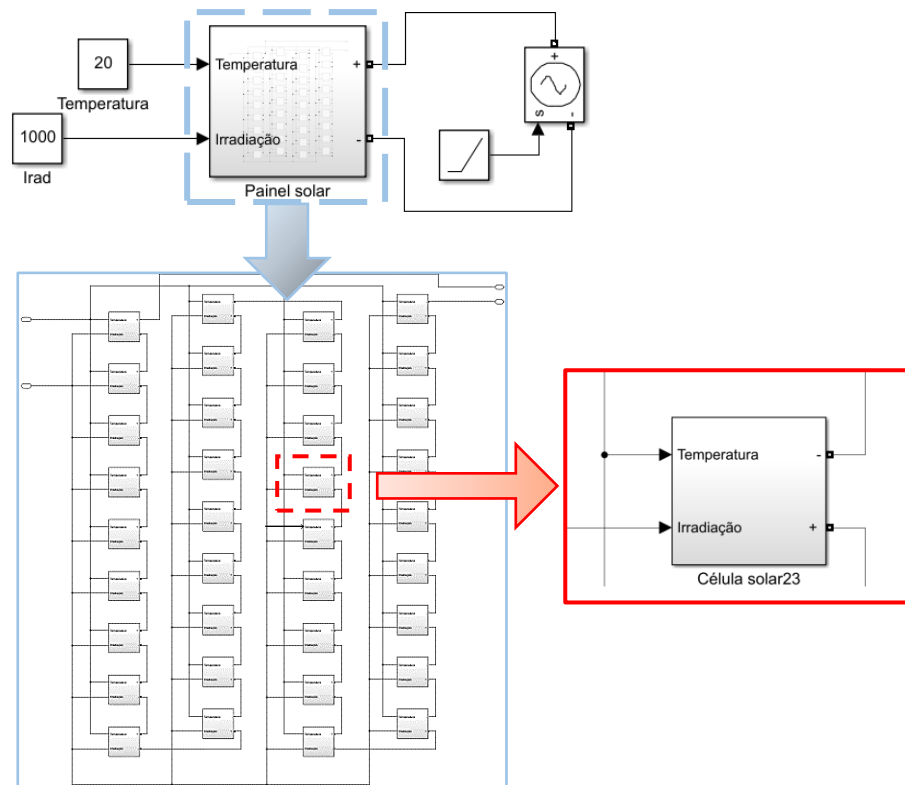
Fonte: O autor, 2020.

### 2.7.2. Painel solar

O painel solar pode ser representado através de uma associação de células, que no caso do painel em uso são 36 ligadas em série. A Figura 32 apresenta as conexões realizadas entre as células que foram implementadas no item anterior e que compõem o painel solar YL020P-17b 1/7 de 20 W.

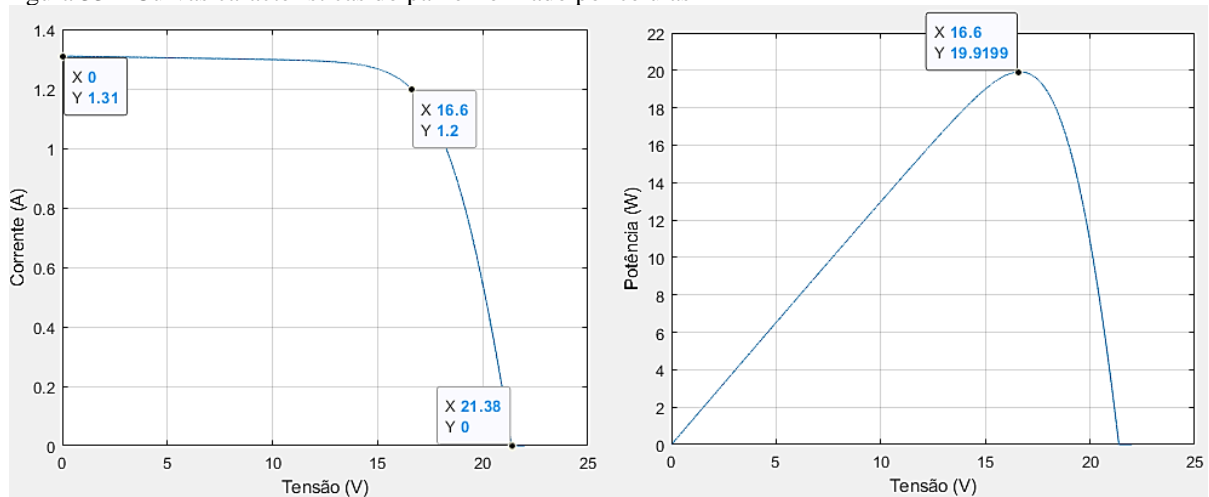
As curvas de corrente e potência por tensão para temperatura de 25°C e densidade de irradiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup> são exibidas na Figura 33, onde é possível verificar que os parâmetros  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{mpp}$  e  $V_{mpp}$  estão compatíveis com o apresentado na folha de dados pelo fabricante e foram alcançados com sucesso.

Figura 32 – Painel solar gerado por associação de células



Fonte: O autor, 2020.

Figura 33 – Curvas características do painel formado por células

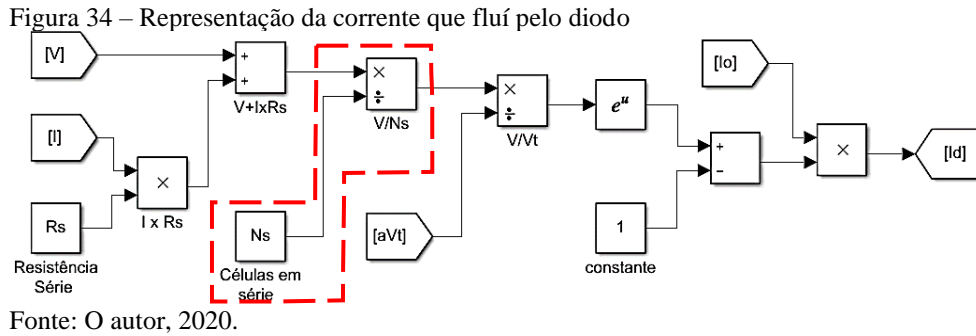


Fonte: O autor, 2020.

Outra forma de simular o painel solar é construindo diretamente um circuito equivalente para o painel, sem a necessidade de realizar conexões entre as células. O circuito possui a mesma estrutura que a célula, mas para isso é necessário alterar a Equação 5 que descreve a corrente do diodo  $I_d$ . Essa alteração é devida, pois, a medida da tensão  $V$  será realizada diretamente nos terminais de saída. A equação reescrita é apresentada na Equação 21 onde a tensão  $V_d$  foi dividida pela quantidade de células que estão em série.

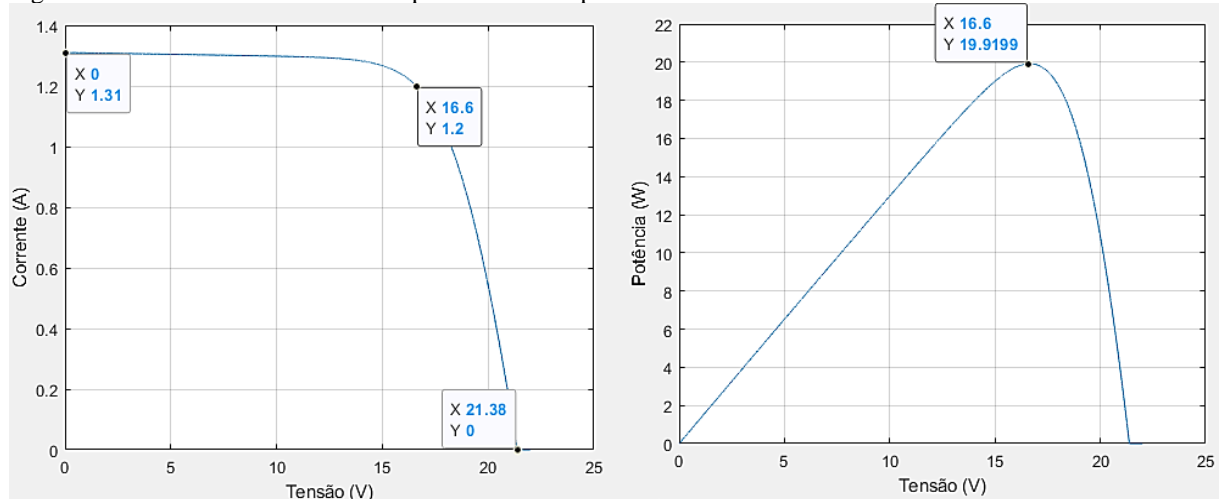
$$I_d = I_0(e^{q(V+I \cdot R_s)/akT N_s} - 1) \tag{21}$$

O novo diagrama para a corrente do diodo é apresentado na Figura 34, com destaque para as alterações realizadas.



A Figura 35 exibe as curvas obtidas com o painel sendo implementado de forma direta. O resultado alcançado é idêntico ao painel implementado com células conectadas, com a conveniência da redução do tempo de simulação, passando de pouco mais de 9 minutos para cerca de 5 segundos na simulação da curva de corrente por tensão com passo fixo de 0,001 s, por exemplo. Essa redução se deve a composição mais simples e análoga a célula individual, com menos cálculos a serem feitos o resultado é obtido com menor tempo.

Figura 35 – Curvas características do painel formado por circuito direto



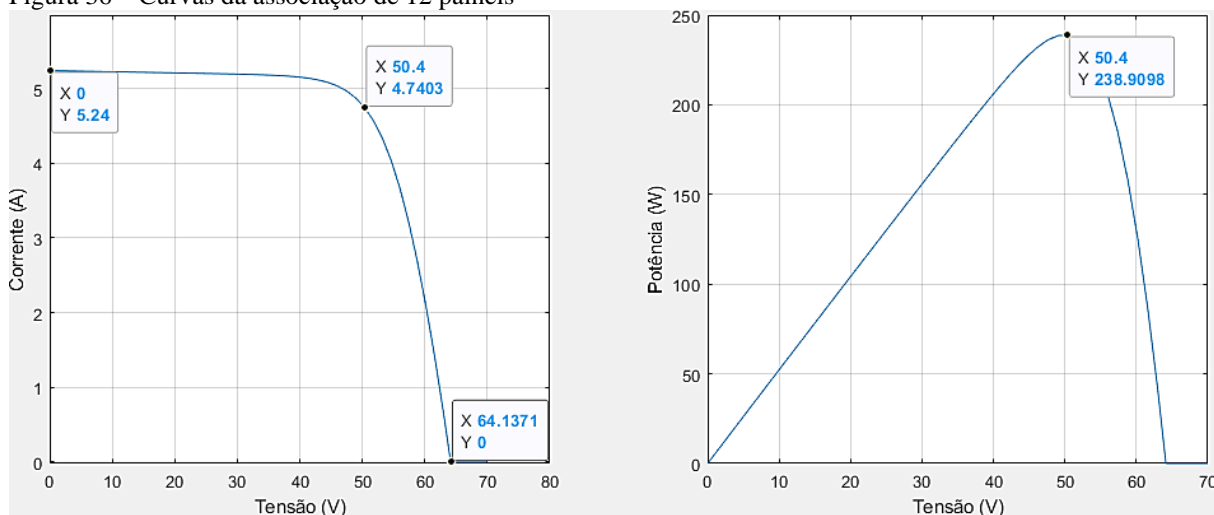
Fonte: O autor, 2020.

### 2.7.3. Associação de painéis

Os conjuntos ou matrizes de painéis são usados na maior parte dos projetos com produção de energia solar. Assim como descrito para células solares no item anterior, os painéis podem ser agrupados em série ou em paralelo visando aumentar a produção energética. Usinas utilizam diversos painéis para abastecer regiões e produtores individuais necessitam instalar mais de um painel para suprir, mesmo que parcialmente, sua demanda de energia.

A Figura 36 apresenta os resultados obtidos em uma associação para aumentar a pequena geração de 20 W do painel usado como referência para 240 W, tornando mais representativa e compatível com aplicações usuais. Esse módulo conta com 4 grupos de painéis em paralelo, cada um com 3 painéis em série, totalizando 12 painéis YL020P-17b 1/7, e será utilizado mais adiante nas aplicações ferramentas para busca da máxima potência. As características observadas na simulação estão apresentadas na Tabela 2.

Figura 36 – Curvas da associação de 12 painéis



Fonte: O autor, 2020.

Tabela 2 – Parâmetros da associação de painéis

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Potência máxima	239 W
Tensão no ponto máximo	50,4 V
Corrente no ponto máximo	4,74 A
Tensão de circuito aberto	64,14 V
Corrente de curto-circuito	5,24 A

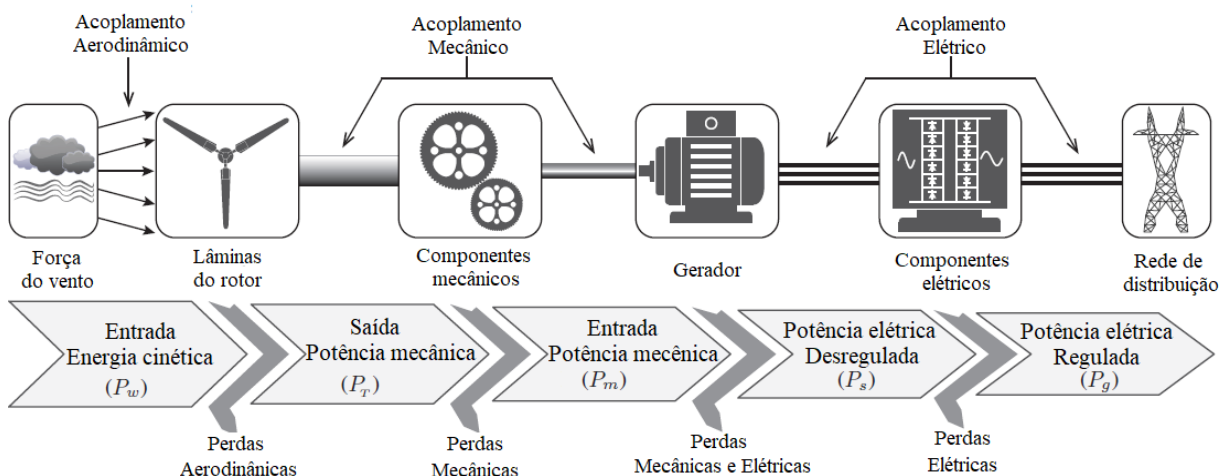
Fonte: O autor, 2020.

### 3. GERAÇÃO EÓLICA

O termo eólico vem do latim *aeolicus*, pertencente ou relativo à *Eólo*, Deus dos ventos na mitologia grega. O aproveitamento da energia contida nos ventos é realizado há milênios em atividades como bombeamento de água, moinhos de trigo, navegação, entre outros. Assim como nas utilizações mais primitivas, as turbinas eólicas também usam o vento para a realização de trabalho, convertendo a energia cinética presente nas massas de ar em energia elétrica.

Esse processo é realizado por meio de diversos componentes mecânicos e elétricos, com perdas associadas a cada um deles. A Figura 37 ilustra essas etapas, desde a movimentação do rotor até a conexão com as linhas de transmissão e indica algumas perdas que ocorrem durante o processo.

Figura 37 – Etapas na produção de energia eólica



O vento é a fonte renovável e gratuita utilizada pelas turbinas eólicas. Sua disponibilidade energética é definida pela velocidade e continuidade no local destinado à instalação do sistema eólico. Ao entrar em contato com as lâminas, parte da energia contida no vento é transferida e com isso é iniciado o movimento do rotor. Nessa etapa ocorre a transformação da energia cinética contida no vento em energia mecânica com a rotação do eixo de acoplamento. A energia mecânica entregue pelo eixo do rotor é transmitida até o gerador através da caixa de engrenagens, onde a velocidade de rotação é alterada para uma faixa compatível com a operação do gerador. De maneira geral a caixa de velocidade aumenta a baixa velocidade do rotor, mas alguns sistemas não utilizam este componente e, nesse caso, o eixo do



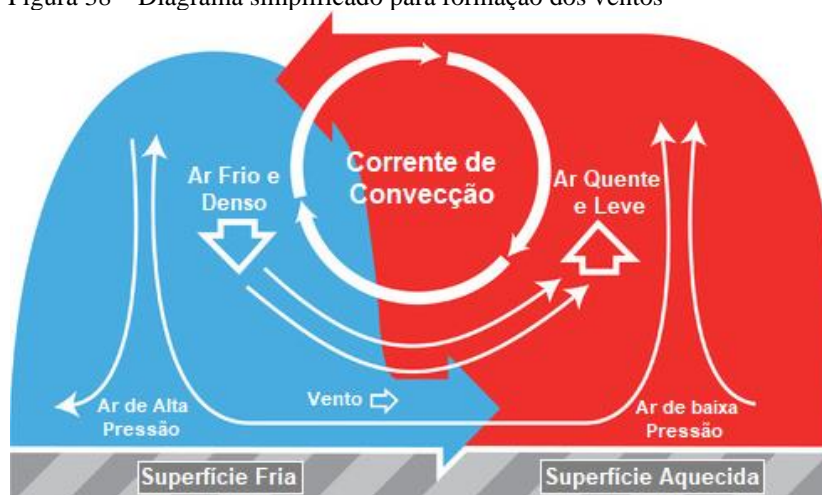
rotor é acoplado diretamente ao gerador, que é o dispositivo que realiza a conversão da energia mecânica em energia elétrica.

Antes da energia ser disponibilizada a carga ou a linha de transmissão, ela passa por uma etapa que adequa suas características elétricas ao mecanismo de transmissão ou aos dispositivos de uso final. Embora não esteja representado no diagrama da Figura 37, os sistemas de controle são de grande importância na produção de energia eólica, pois é responsável pelo controle da carga, orientação do rotor, controle de velocidade e para que seja encontrado o ponto de máxima produção de energia.

### 3.1. Formação dos ventos

O vento é o movimento do ar que ocorre entre as regiões de alta e baixa pressão da atmosfera, geradas através do aquecimento desigual da superfície terrestre por raios solares. O movimento de rotação da Terra e obstáculos como nuvens e irregularidades apresentadas na superfície dela contribuem para o aquecimento não uniforme e colaboram com o processo de formação dos ventos. O deslocamento de ar gerado nesse processo é ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Diagrama simplificado para formação dos ventos



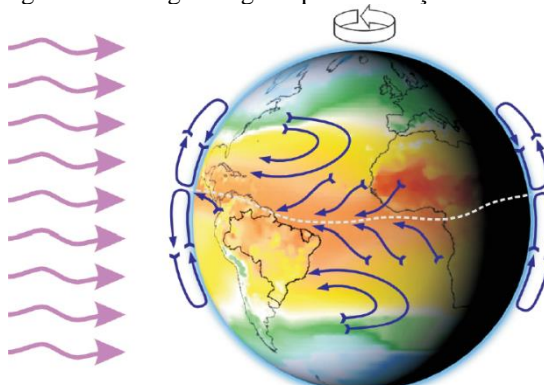
Fonte: Adaptado de OTTEN e BELLAFFIORE, 2018.

Quando o ar que está próximo de uma área quente é aquecido, é gerado um deslocamento de ar vertical ascendente que cria uma zona de baixa pressão e com isso o ar da zona de pressão superior flui em direção à área de baixa pressão, criando vento. Como esse

deslocamento de ar é gerado pelo aquecimento do sol, a energia eólica também é chamada de "energia solar indireta" (PARASCHIVOIU, 2002, p. 1).

O movimento de rotação terrestre provoca outro fator relevante para a compreensão da formação dos ventos, o efeito Coriolis. Essa é uma pseudoforça, considerada de reação ao movimento e usada para análises com referenciais não inerciais quando o corpo em estudo não se encontra em repouso em relação ao referencial local. A força de Coriolis atua sobre o corpo em movimento e é sempre perpendicular a este, alterando seu curso. A Força de Coriolis é uma das responsáveis pela direção do movimento de grandes massas de ar, em que desvia os ventos no sentido horário no Hemisfério Norte e no sentido anti-horário no Hemisfério Sul (VAREJÃO-SILVA, 2006, p. 48). A Figura 39 apresenta um diagrama geral da formação dos ventos com a representação de algumas correntes de ar.

Figura 39 – Diagrama geral para formação dos ventos



Fonte: AMARANTE, BROWER, et al., 2001, p. 23.

A velocidade dos ventos não é constante e pode ser alterada pela topologia, localização geográfica e a altitude, gerando variações instantâneas ou sazonais. Montanhas, edificações e outros obstáculos podem reduzir a velocidade das correntes de ar, gerar turbulências e até alterar sua direção. Regiões com construções elevadas só atingem velocidades razoáveis de vento após uma elevada altura. Para altitudes abaixo de 100 m a relação da velocidade de vento com a altura do solo pode ser descrita pela fórmula empírica da Equação 22.

$$v(h) = v_0 \cdot \left[ \frac{h}{h_0} \right]^\alpha \quad (22)$$

Onde  $v_0$  é a velocidade na altura  $h_0$ ,  $v$  velocidade na altura  $h$  e  $\alpha$  o coeficiente de fricção do terreno. Alguns valores para esse coeficiente são apresentados na Tabela 3. Dependendo de sua velocidade, os ventos podem ser classificados por meio da escala Beaufort (INSTITUTO

NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2018), que qualifica a intensidade dos ventos e está descrita na Tabela 4.

Tabela 3 - Coeficiente de fricção para diferentes terrenos

<b>Característica do terreno</b>	<b>Coeficiente de fricção (<math>\alpha</math>)</b>
Solo duro e liso, água calma	0,10
Gramma alta em terreno plano	0,15
Culturas altas, sebes e arbustos	0,20
Campo arborizado, muitas árvores	0,25
Pequena cidade com árvores e arbustos	0,30
Cidade grande com prédios altos	0,40

Fonte: Masters, 2004.

Tabela 4 – Classificação dos ventos

<b>Grau</b>	<b>Descrição</b>	<b>Velocidade média (m/s)</b>
<b>0</b>	Calmaria	0 – 0,2
<b>1</b>	Bafagem	0,3 – 1,5
<b>2</b>	Aragem	1,6 – 3,3
<b>3</b>	Fraco	3,4 – 5,4
<b>4</b>	Moderado	5,5 – 7,9
<b>5</b>	Fresco	8 – 10,7
<b>6</b>	Muito fresco	10,8 – 13,8
<b>7</b>	Forte	13,9 – 17,1
<b>8</b>	Muito forte	17,2 – 20,7
<b>9</b>	Duro	20,8 – 24,4
<b>10</b>	Muito duro	24,5 – 28,4
<b>11</b>	Tempestuoso	28,5 – 32,6
<b>12</b>	Furacão	$\geq 32,7$

Fonte: DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO, 2018, Anexo B.

### 3.2. Breve histórico sobre aerogeradores

Moinhos de vento são utilizados pela humanidade desde o século V, habitualmente na movimentação de mecanismos de trituração de cereais e no transporte de água para níveis mais elevados. De fato, essas estruturas utilizam energia eólica, pois são máquinas movidas através da energia contida nos ventos, mas a primeira menção que poderia ser usada na produção de

energia elétrica foi em 1881, por Lord Kelvin. Em 1887, foi construída a primeira turbina eólica para produção de eletricidade, instalada pelo engenheiro elétrico escocês Professor James Blyth. No inverno de 1888 o americano Charles F. Brush ergueu uma grande turbina eólica que carregava baterias para uso em sua casa e laboratório e se manteve em funcionamento por mais de 20 anos. No ano de 1891 o físico e meteorologista dinamarquês Poul la Cour recebeu recursos do governo para realizar testes de produção de energia em zonas rurais (PEDERSEN, 2010, p. 3).

Aos poucos a utilização de geradores eólicos teve forte crescimento por ser uma boa opção em áreas isoladas e por usar um recurso renovável e disponível de forma abrangente. Em meados da década de 1920 existiam geradores com potências entre 200 e 3 kW no mercado norte americano e nas décadas seguintes já estava presente em centenas de milhares de fazendas e residências afastadas das linhas de transmissão. Em 1941 um dos maiores sistemas de geração eólico localizado em Grandpa's Knob no estado de Vermont entrou em operação, o primeiro na escala de megawatts, mais exatamente 1250 kW, e chegou a suportar ventos de até 115 milhas por hora, mas em 1945 uma de suas pás de 8 toneladas quebrou e foi arremessada por 750 pés. A produção de aerogeradores foi desativada gradualmente nas décadas de 1950 e 1960, à medida que as redes de eletrificação passaram a dominar o atendimento rural (MASTERS, 2004, p. 307).

A crise do petróleo de 1970 aumentou a conscientização sobre problemas na geração de energia e motivou incentivos financeiros e regulatórios substanciais para sistemas de energia alternativa como a eólica e a solar. Medidas adotadas na Califórnia, Dinamarca e Alemanha contribuíram para aquecer a produção de aerogeradores, alavancando o desenvolvimento tecnológico através de um regime de competição entre indústrias nas décadas de 1980 e 1990, reduzindo os custos de construção e instalação de sistemas individuais e de usinas elétricas (MASTERS, 2004, p. 308) (AMARANTE, BROWER, *et al.*, 2001, p. 13).

No final do ano de 2019 a capacidade instalada no mundo inteiro alcançou o valor de 650 GW, com o maior crescimento dos últimos anos, de 10% em relação ao ano anterior (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2020, p. 36). O Brasil teve um grande crescimento em instalações eólicas, com valores de produção modestos, mas com percentuais acima dos índices mundiais de cada ano. De 2009 a 2018 capacidade instalada passou de 602 MW para 14.390 MW (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020, p. 158).

### 3.3. Tipos de turbinas

Uma forma de classificar as turbinas eólicas é através do eixo em torno do qual as pás da turbina giram, dividindo em dois grupos fundamentais: turbinas horizontais e verticais.

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. Nele, o eixo do gerador é colocado horizontalmente em relação ao solo e o conjunto elétrico e aerodinâmico são instalados em alturas elevadas para aproveitar ventos com maior velocidade e assim oferecer alta eficiência de conversão de energia eólica.

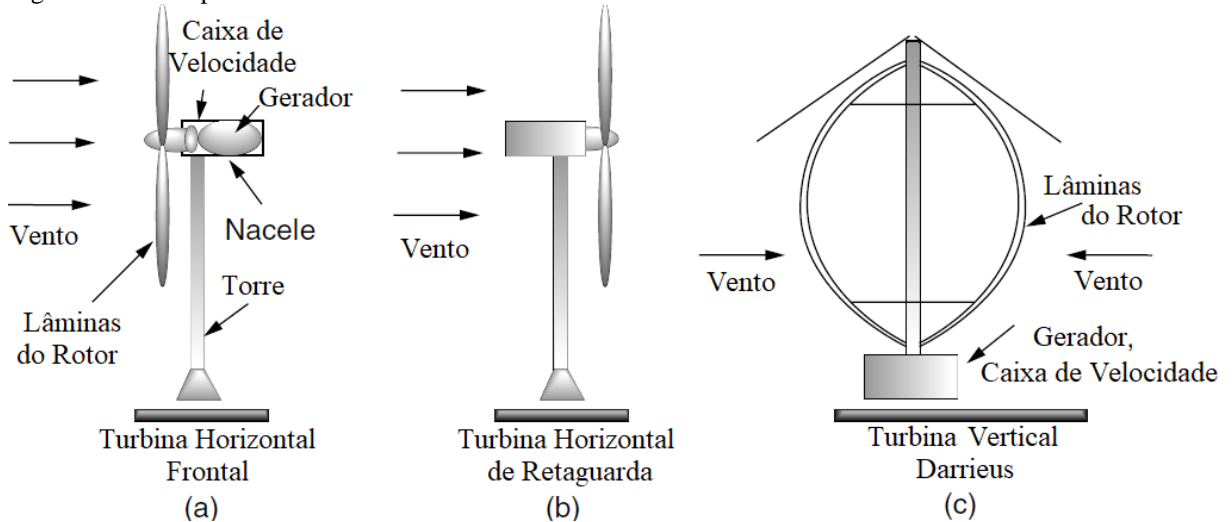
As turbinas horizontais podem ser construídas para que o movimento do rotor seja realizado com ventos recebidos pela parte posterior da turbina ou diretamente pela parte frontal (Figura 40). A primeira é conhecida como turbina de retaguarda (ou *downwind*) na qual o vento sopra pela retaguarda das pás e o rotor se orienta de forma natural. A segunda é mais utilizada, chamada turbina frontal (ou *upwind*), e tem o controle de direção mais complexo. Apesar do ajuste automático de direção na turbina *downwind*, por conta de sua característica de construção, o vento passa primeiro pela torre e pelo conjunto motor antes de chegar ao rotor o que causa perturbações no ar deslocado, reduzindo sua eficiência. Já o ajuste realizado na *upwind* altera a direção de forma suave e consegue extrair maior potência (MASTERS, 2004, p. 311).

As turbinas de eixo vertical possuem o eixo perpendicular ao solo e o rotor da turbina é implementado por perfis aerodinâmicos curvos, conforme exibido na Figura 40, também montados verticalmente com diferentes projetos dependendo do modelo. Esses geradores aceitam vento de qualquer direção e possuem bom comportamento em ventos turbulentos, portanto, não é necessário alterar a orientação das lâminas com nenhum tipo de controle de guinada para mantê-los voltados na direção correta.

O grande comprimento das pás pode fazer com que exista uma diferença entre as forças incidentes nos extremos do rotor, por conta de velocidades de vento desiguais, o que pode gerar vibrações mecânicas, barulho e fadiga no material. Isso pode ocorrer em ambos os casos, mas

especialmente na turbina vertical por conta do rotor longo e de sua proximidade com o solo, onde o vento é mais lento e turbulento.

Figura 40 – Exemplos de turbina



Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004, p. 310.

A instalação e manutenção de turbinas verticais são mais fáceis de executar e com isso se tornam mais baratas do que as horizontais, pois o gerador, caixa de engrenagens e outros componentes mecânicos são colocados perto do chão. Contudo, a eficiência na conversão de energética é menor nas turbinas verticais e como sua regulação de potência aerodinâmica é mais complicada, a aplicação de turbinas verticais se torna inadequada para produção de altas potências, mas uma boa opção para instalações em prédios ou residências dentro das cidades.

### 3.4. Princípio de Funcionamento

A potência que uma turbina é capaz de gerar depende diretamente da velocidade do vento que atravessa as pás. A análise da capacidade de produção do aerogerador pode ser iniciada a partir da energia contida em uma massa de ar em movimento, que é descrita na Equação 23.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (23)$$

A potência instantânea pode ser obtida derivando a equação anterior, conforme é apresentado na Equação 24.

$$P_V = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \quad (24)$$

A derivada de  $m$  é a quantidade de massa que escoar através de uma secção transversal de área  $A$  por unidade de tempo, também chamada de vazão mássica ou fluxo de massa, descrita na Equação 25.

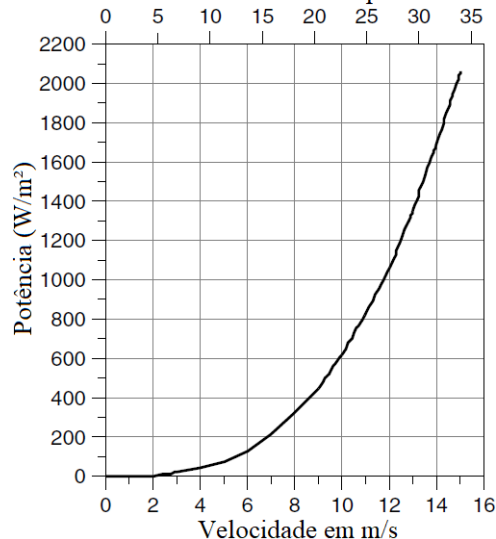
$$\frac{dm}{dt} = \dot{m} = \rho A v \quad (25)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica do fluido, nesse caso do ar,  $A$  é a área da secção transversal e  $v$  a velocidade na direcção do escoamento. Assim, a Equação (24) pode ser reescrita pela Equação 26.

$$P_V = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (26)$$

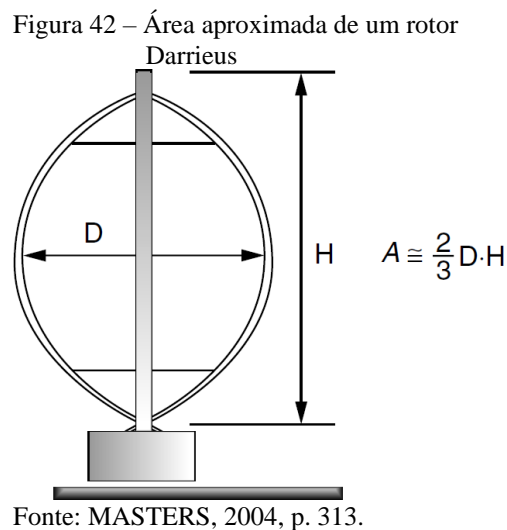
A Equação 26 indica que a energia eólica é proporcional à área varrida do rotor da turbina. Para uma turbina convencional de eixo horizontal a energia eólica é proporcional ao quadrado do diâmetro da lâmina e dobrar o diâmetro aumenta em quatro vezes a potência disponível. Outro ponto interessante é que uma região com o dobro da velocidade dos ventos pode gerar uma potência oito vezes maior, pois a potência é proporcional ao cubo da velocidade do vento. A Figura 41 mostra graficamente a relação entre a velocidade do vento e a potência disponível por metro quadrado de secção transversal, a 15 °C e 1 atm.

Figura 41 – Relação entre a velocidade do vento e a potência disponível



Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004, p. 313.

A descrição apresentada pode ser aplicada em qualquer tipo de turbina, mas, dependendo do desenho do rotor, encontrar a sua área varredura pode ser um pouco mais complicado, principalmente no caso das turbinas verticais. Para um rotor Darrieus, que é uma das turbinas verticais mais usadas, a aproximação da área representa cerca de dois terços da área de um retângulo formado pela largura máxima do rotor e altura igual à extensão vertical das pás, conforme mostrado na Figura 42 (MASTERS, 2004, p. 313).



As equações acima descrevem a energia existente no movimento de uma massa de ar, mas nem toda energia contida é convertida pela turbina. Caso fosse possível extrair toda a energia cinética contida no vento, o deslocamento iria cessar imediatamente após passar pela turbina, interrompendo o fluxo e parando o aerogerador. O máximo rendimento aerodinâmico possível foi descrito por Albert Betz como sendo 59,3% e esse fator é representado pelo Coeficiente de Potência ( $C_p$ ). Segundo Paulo Roberto Rodrigues (2011, p. 14), a potência gerada pela turbina pode ser obtida a partir da Equação 26, inserindo-se o coeficiente  $C_p$  e mais um fator para representar as limitações aerodinâmicas e as eficiências de outros acoplamentos, conforme apresentado na Equação 27.

$$P_{turbina} = \eta C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (27)$$

Na qual a constante  $\eta$  representa a eficiência do conjunto gerador, incluindo rendimento da caixa multiplicadora de velocidade, e  $C_p$  o Coeficiente de Potência das lâminas do rotor. Uma forma de expressar  $C_p$  é apresentada na Equação 28.



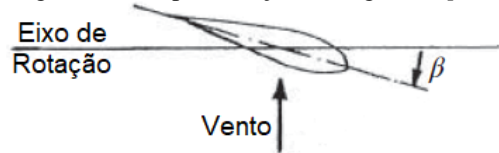
$$C_p = \frac{\text{Potência disponível no eixo}}{\text{Potência gerada}} \quad (28)$$

Esse coeficiente depende principalmente de dois fatores e, segundo Yaramasu e Wu (2017, p. 444) pode ser descrito conforme Equação 29.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2 - C_3\beta^2 - C_4)e^{-C_5} + C_6\lambda \quad (29)$$

O primeiro parâmetro ( $\lambda$ ) é a relação entre velocidade da ponta da lâmina do rotor e a velocidade do vento incidente (TSR, do inglês *Tip Speed Ratio*), descrito pela Equação 30. O segundo é o ângulo de passo ou de *pitch*,  $\beta$ , que é o ângulo formado entre o eixo de rotação e o centro da secção transversal da lâmina do rotor (Figura 43).

Figura 43 – Representação do ângulo de *pitch*



Fonte: Adaptado de HEIER, 2014, p. 41.

$$\lambda = \frac{v_u}{v_1} \quad (30)$$

Os coeficientes  $C_1$  a  $C_6$  usados nas simulações estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros do coeficiente de potência

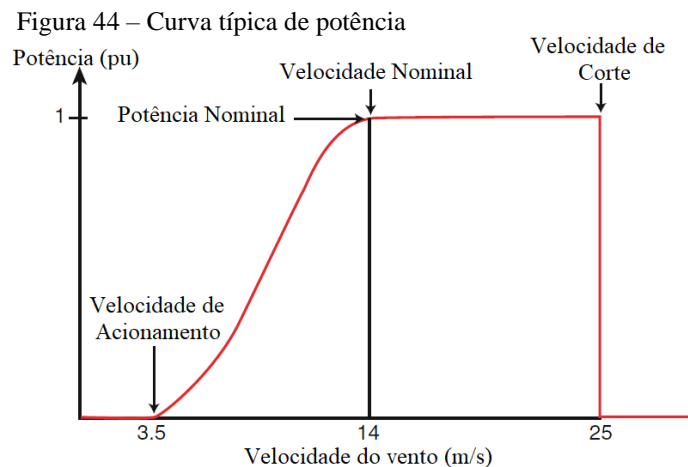
Coeficiente	Valor
$C_1$	0,5176
$C_2$	$116 \lambda_l^{-1}$
$C_3$	0,4
$C_4$	5
$C_5$	$21 \lambda_l^{-1}$
$C_6$	0,0068

Fonte: THE MATHWORKS, INC., 2020.

No qual  $\lambda_l$  pode ser encontrado através da Equação 31.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (31)$$

O coeficiente é constante durante uma parte da curva de potência do aerogerador e, mesmo que a energia cinética contida no vento aumente proporcionalmente com a velocidade, o gerador não acompanhará o crescimento por conta de limitações mecânicas e de construção. Essa informação normalmente é apresentada pelo fabricante e é um dos dados técnicos mais importantes para uma turbina eólica. Na Figura 44 é exibida uma curva de potência idealizada, que mostra a relação entre a velocidade do vento e a saída elétrica do gerador.



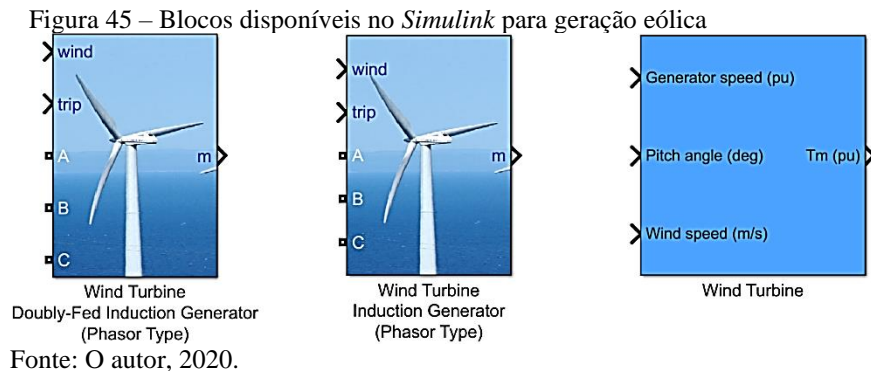
Na parte inicial do gráfico, a potência gerada é nula, pois o vento não é forte o suficiente para superar as forças que se opõem ao movimento como atrito ou a inércia e movimentar o rotor da turbina. Mesmo que isso ocorra e o rotor esteja em movimento, a energia gerada pode não ser suficiente para compensar a energia exigida pelos enrolamentos de campo do gerador. A velocidade de corte inferior é o mínimo necessário para gerar energia ou para que o conteúdo energético do vento justifique seu aproveitamento. A energia disponível em velocidades abaixo do corte inferior não é aproveitada e não se torna uma grande perda, tendo em vista que não há muita energia nesses ventos (MASTERS, 2004, p. 355).

Quando a velocidade do vento está entre a mínima e a nominal, a potência varia cubicamente com a velocidade, a maior parte da potência do vento é aproveitada e o coeficiente de potência atinge seu valor máximo projetado. Ao alcançar a velocidade nominal, a turbina eólica irá fornecer energia para qual foi projetada. Acima desse ponto é necessário que o sistema de controle atue e a potência é mantida constante, mesmo com o aumento da velocidade do vento, caso contrário gerador pode ser danificado (MASTERS, 2004, p. 356) (YARAMASU e WU, 2017, p. 8).

Ao atingir a velocidade máxima a máquina deve ser desligada para evitar danos, pois ventos fortes podem causar danos à turbina danificado (MASTERS, 2004, p. 357) (YARAMASU e WU, 2017, p. 8).

### 3.5. Implementação computacional

O modelo de uma turbina eólica elaborado no ambiente computacional utiliza blocos do próprio *Simulink* para descrever as características aerodinâmicas do rotor e o gerador CC, os demais blocos foram elaborados para adequar as características de um ao outro e para controlar a potência gerada. A Figura 45 apresenta três blocos disponíveis, no qual os dois primeiros são turbinas completas com barramento trifásico, diferenciadas pelo tipo de gerador aplicado. O terceiro bloco implementa as características aerodinâmicas de um rotor horizontal, através das equações exibidas no item 3.4, mas dessa vez normalizadas para trabalhar com parâmetros em parte por unidade (pu).



As características da hélice do rotor serão simuladas pelo terceiro bloco (“*Wind Turbine*”), ligado a um gerador de corrente contínua (CC) também fornecido presente no *Simulink* através do bloco “*DC Machine*”, que descreve uma máquina de corrente contínua, seja ela motor ou gerador, com enrolamentos de campo ou ímã permanente.

Segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (2014, p. 436), além de normalmente ter tamanho e custo inferior a máquinas com enrolamento de campo, máquinas de ímã permanente não necessitam de excitação externa e com isso não dissipam potência correspondente para criar campos magnéticos. Sendo assim, a descrição contará com um gerador CC de ímã permanente,

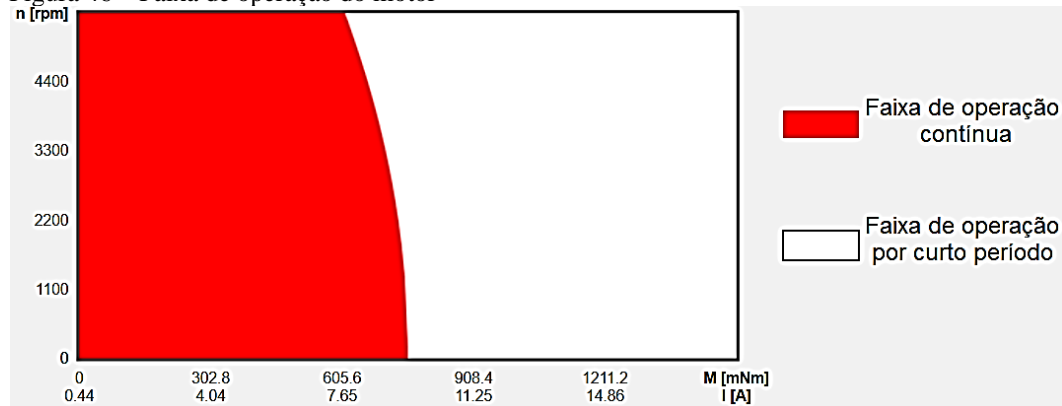
com dados de base do motor de 250 Watts com escovas fabricado pela Maxon. Sua folha de dados é apresentada no Anexo E – Folha de dados do motor CC Maxon 353296, que tem as principais características exibidas na Tabela 6 e faixa de operação apresentada em vermelho na Figura 46.

Tabela 6 – Dados do gerador

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Potência Nominal	250 W	Resistência Interna	0,174 $\Omega$
Tensão Nominal	36 V	Indutância Interna	76 mH
Rotação Nominal	387,46 Rad/s	Eficiência	87%
Torque Nominal	0,751 Nm	Constante de Torque	0,084 Nm/A
Inércia do Rotor	1380 gcm <sup>2</sup>	Constante de Velocidade	113 RPM/V

Fonte: MAXON MOTOR GROUP, 2020, p. 143.

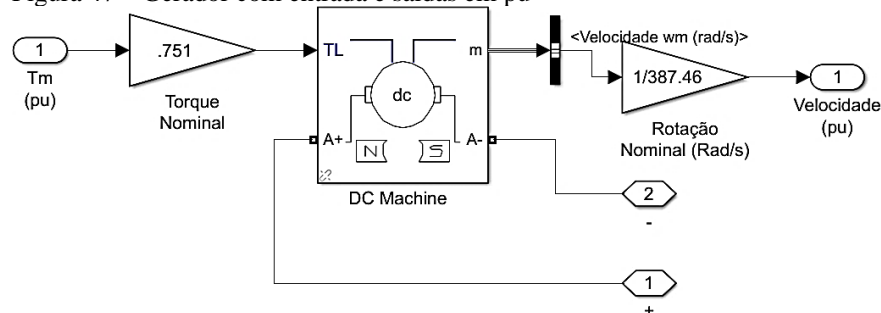
Figura 46 – Faixa de operação do motor



Fonte: Adaptado de MAXON MOTOR GROUP, 2020.

Para adequar as características de entrada e saída do gerador ao bloco aerodinâmico é necessário converter o torque de pu para Nm e a rotação nominal de RPM para pu. Essas alterações foram realizadas com a adição de blocos de ganho com os valores nominais do gerador presentes na Tabela 6 e as conexões podem ser vistas na Figura 47.

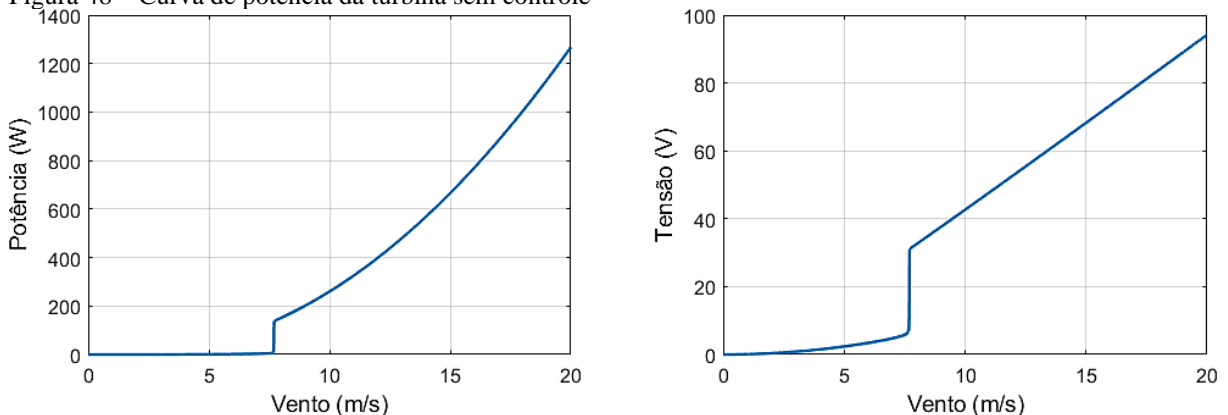
Figura 47 – Gerador com entrada e saídas em pu



Fonte: O autor, 2020.

Mesmo após realizar essas adequações e conectar os dois blocos (aerodinâmico e gerador), os resultados produzidos não são compatíveis com os de uma turbina eólica. Tal comportamento se torna evidente ao observar os gráficos da Figura 48, que apresenta a curva de potência do conjunto onde é possível notar o crescimento exponencial a medida que a velocidade do vento aumenta, extrapolando os limites físicos do gerador. O início do crescimento, que ocorre pouco antes de 8 m/s, é dependente da carga acoplada aos terminais do gerador, nesse caso de  $7 \Omega$ .

Figura 48 – Curva de potência da turbina sem controle



Fonte: O autor, 2020.

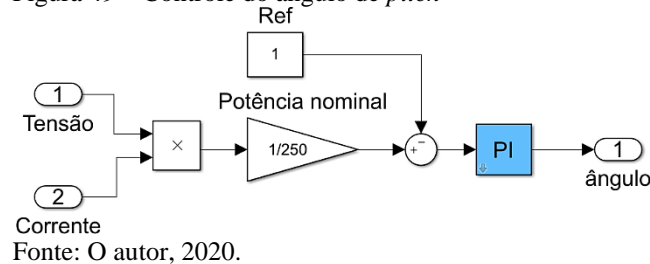
Para tornar a potência produzida pelo aerogerador constante após atingir a velocidade nominal, conforme apresentado na curva característica da Figura 44, é necessário que o sistema possua algum mecanismo de controle para reduzir a velocidade do rotor e, por conseguinte, a potência produzida. Esse tipo de controle permite que a turbina eólica mantenha sua produção igual ao valor nominal e constante para uma faixa de velocidade de vento a partir de sua velocidade nominal, sem extrapolar os limites da faixa de operação do aerogerador e danificá-lo. Segundo Rodrigues (2011, p. 21) e Heier (2014, p. 57), turbinas modernas utilizam controle aerodinâmico para limitar a extração de potência nominal do aerogerador, sendo os mais comuns o controle por *stall* e o controle de *pitch* (ou controle de passo).

O controle de *pitch* é um controle ativo que altera o ângulo  $\beta$ , exibido na Figura 43. Quando a potência gerada ultrapassa seu valor nominal as pás são rotacionadas, formando assim uma espécie de freio que diminui as forças aerodinâmicas atuantes e conseqüentemente reduz a velocidade do rotor. Já o controle por *stall* é um sistema passivo, que reage à velocidade do vento no qual as pás do rotor são fixas e não podem girar em torno de seu eixo. Nele as pás são projetadas aerodinamicamente de forma a limitar a potência extraída para ventos com

velocidades acima da nominal, reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Menores forças de sustentação e maiores arrastos atuam contra o aumento da potência do rotor.

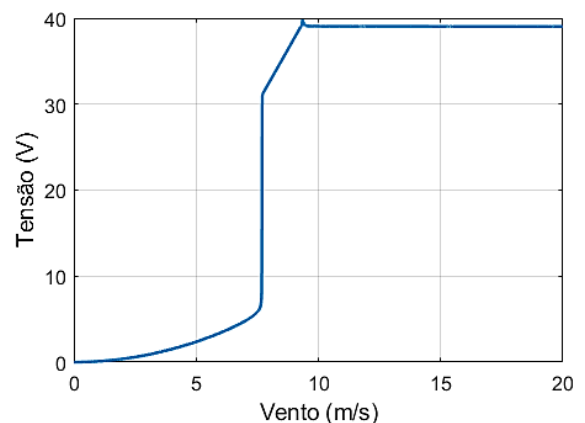
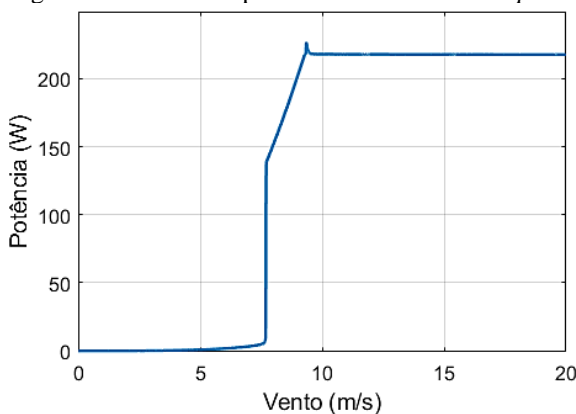
Embora turbinas com controle *stall* sejam mais simples do que as com controle de passo, o modelo computacional utilizará o controle de *pitch*, haja visto que o bloco relativo ao rotor disponibilizado no *Simulink* possui uma entrada que permite alteração desse ângulo. Seu controle é realizado a partir do erro entre a potência gerada e a nominal. Esse sinal é a entrada do controlador proporcional e integral (PI), destacado em azul na Figura 49, que tem como objetivo manter uma variação suave entre as diferenças e acumulá-las para manter o ângulo de correto.

Figura 49 – Controle do ângulo de *pitch*



Os resultados obtidos com a inserção do controle de *pitch* são exibidos Figura 50 e é possível observar a limitação da potência de saída para o valor determinado, com um pico suave ao atingir o valor de referência. Também é possível notar que a faixa entre a velocidade de acionamento e a nominal é curta. Essa característica está fortemente ligada ao valor de resistência da carga, que impede a partida do gerador e, ao modificá-la, a excursão pode ser aumentada ou reduzida.

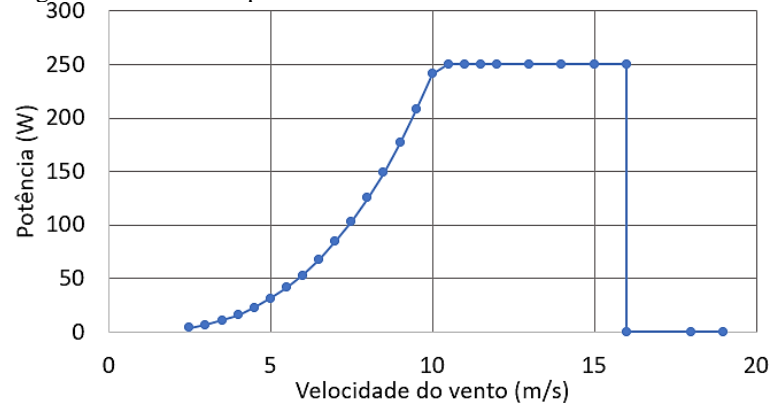
Figura 50 – Curva de potência com controle de *pitch*



Fonte: O autor, 2020.

A utilização de técnicas para maximizar a potência produzida, que são apresentadas no Capítulo 5, podem minimizar o efeito da carga na partida, contribuindo para que a turbina gere energia com baixas velocidades de vento. A Figura 51 apresenta a curva característica do aerogerador com a aplicação desses sistemas.

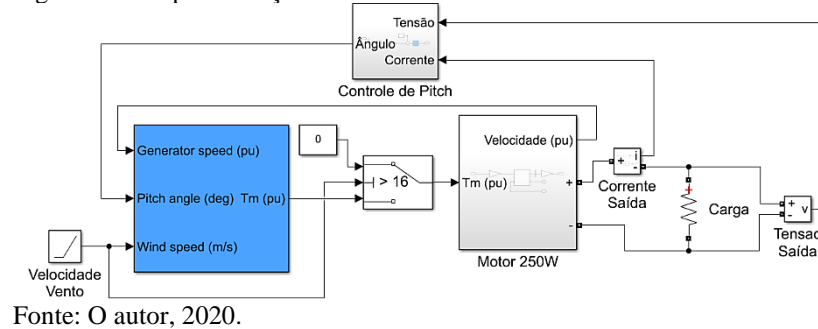
Figura 51 – Curva de potência da turbina eólica com controlador



Fonte: O autor, 2020.

A representação final da turbina eólica no *Simulink* é exibida na Figura 52, a qual foi adicionado um comutador que interrompe a movimentação do gerador ao alcançar a velocidade de 16 m/s, além dos parâmetros inseridos anteriormente.

Figura 52 – Implementação da turbina no *Simulink*



Fonte: O autor, 2020.

#### 4. CONVERSORES DE TENSÃO

Para adequar a amplitude da tensão gerada por ambas as fontes de energia, é necessário inserir um conversor de tensão e assim assegurar que as características do banco de baterias serão atendidas, bem como a carga CA. Como o banco de baterias e as fontes geradoras aqui apresentadas operam com corrente contínua, o conversor utilizado para conectar as fontes ao barramento CC será um conversor CC-CC. Existem diversos conversores deste tipo, segundo Luo e Ye (2018, p. 133) são mais de 600 protótipos diferentes descritos na atualidade. Em Rashid (2018, p. 275) são apresentadas as seguintes funcionalidades de um conversor CC-CC:

- Converter a tensão de entrada em outro valor na saída (ambos CC);
- Regular a tensão de saída CC contra variações de carga e linha;
- Reduzir a ondulação na tensão de saída CC;
- Fornecer isolamento entre a fonte de entrada e a carga (o isolamento nem sempre é necessário);
- Proteger o sistema alimentado e a fonte de entrada contra interferência eletromagnética (EMI);
- Satisfazer padrões de segurança internacionais e nacionais.

Os conversores CC-CC serão aplicados ao sistema híbrido para atingir os seguintes objetivos:

- aplicar algoritmos de busca para máxima transferência de potência (MPPT);
- adequar a tensão das fontes de energia ao barramento;
- aumentar a tensão do barramento CC para adequá-la ao inversor.

Todos os conversores CC-CC foram simulados com cargas resistivas ligadas diretamente aos terminais de saída do conversor, ou seja, nesses testes foram utilizadas cargas CC. No inversor a carga de teste utilizada é semelhante ao sistema híbrido, que é alternada (CA).

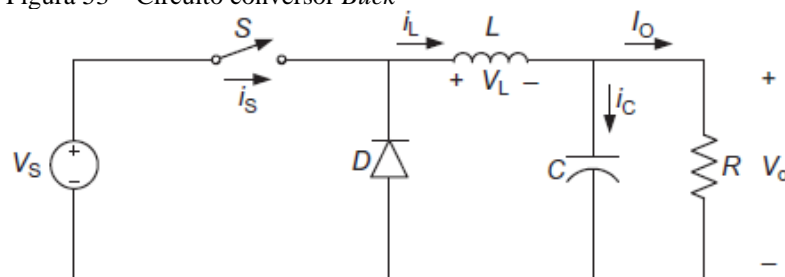


O conversor CC-CA empregado no ramo final do sistema híbrido é o módulo responsável por converter a tensão do barramento CC em alternada, ampliando assim a possibilidade de utilizações da energia gerada e armazenada. Todos os conversores utilizados são apresentados e simulados nos itens a seguir.

#### 4.1. Conversor *Buck*

O conversor *Buck* é um circuito que reduz a tensão existente na entrada para um valor desejado na saída. A Figura 53 apresenta a descrição elétrica mais simples desse tipo de circuito, composto por um indutor ( $L$ ), um capacitor ( $C$ ), um diodo ( $D$ ) e um circuito de chaveamento. A carga é representada pela resistência  $R$ ,  $V_s$  é a tensão de entrada,  $V_o$  a tensão de saída e a chave  $S$  é o elemento de chaveamento.

Figura 53 – Circuito conversor *Buck*

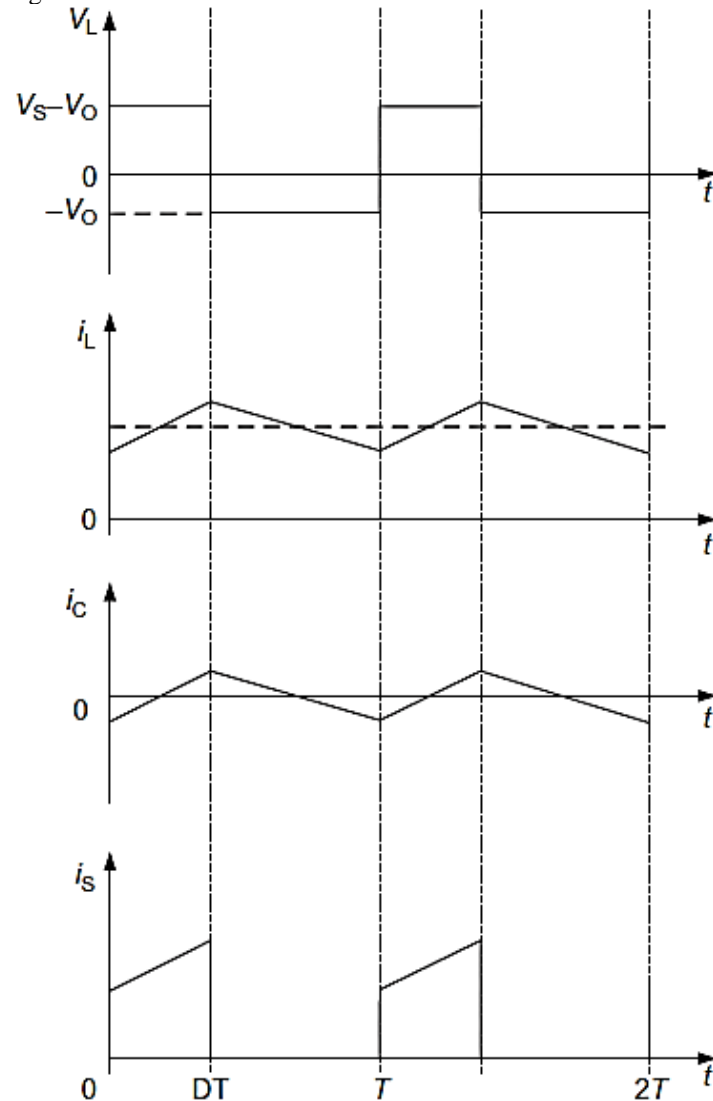


Fonte: RASHID, 2018, p. 277.

A chave  $S$  alterna entre os estados aberta e fechada com frequência  $f$ , a qual  $DT$  é a duração do período quando fechada. A variável  $D$  representa o período ativo e é chamado de razão cíclica ou ciclo de trabalho (do inglês, *duty cycle*). A relação entre as tensões de entrada e saída é apresentada na Equação 32 e a Figura 54 exhibe as formas de onda desse circuito.

$$V_o = DV_s \quad (32)$$

Quando a chave  $S$  está fechada, a corrente no indutor aumenta e, ao alterar seu estado para aberto, a energia armazenada nele decai, gerando uma corrente que circula através do diodo e da carga  $R$ .

Figura 54 – Formas de onda do conversor *Buck*

Fonte: RASHID, 2018, p. 277.

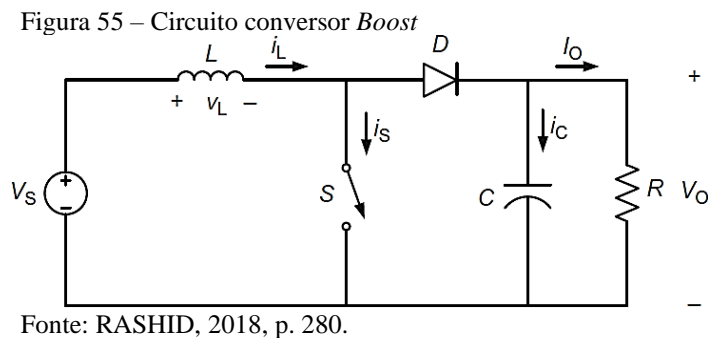
O valor mínimo para o indutor é definido através da Equação 33 e a capacitância  $C$  pode ter o seu valor mínimo calculado com a Equação 34 ou considerada alta o suficiente para negligenciar a flutuação de tensão na saída.

$$L_{min} = \frac{1 - D}{2f} R \quad (33)$$

$$C_{min} = \frac{(1 - D)V_o}{8L\Delta v_c f^2} \quad (34)$$

## 4.2. Conversor *Boost*

Os conversores *Boost* modificam a amplitude da tensão de saída para um valor maior que a de entrada. Seu circuito elétrico contém os mesmos componentes que o anterior, mas com os elementos rearranjados. A Figura 55 mostra esse tipo de circuito, onde  $V_s$  é a tensão de entrada,  $V_o$  a tensão de saída e  $S$  representa a chave semicondutora empregada.



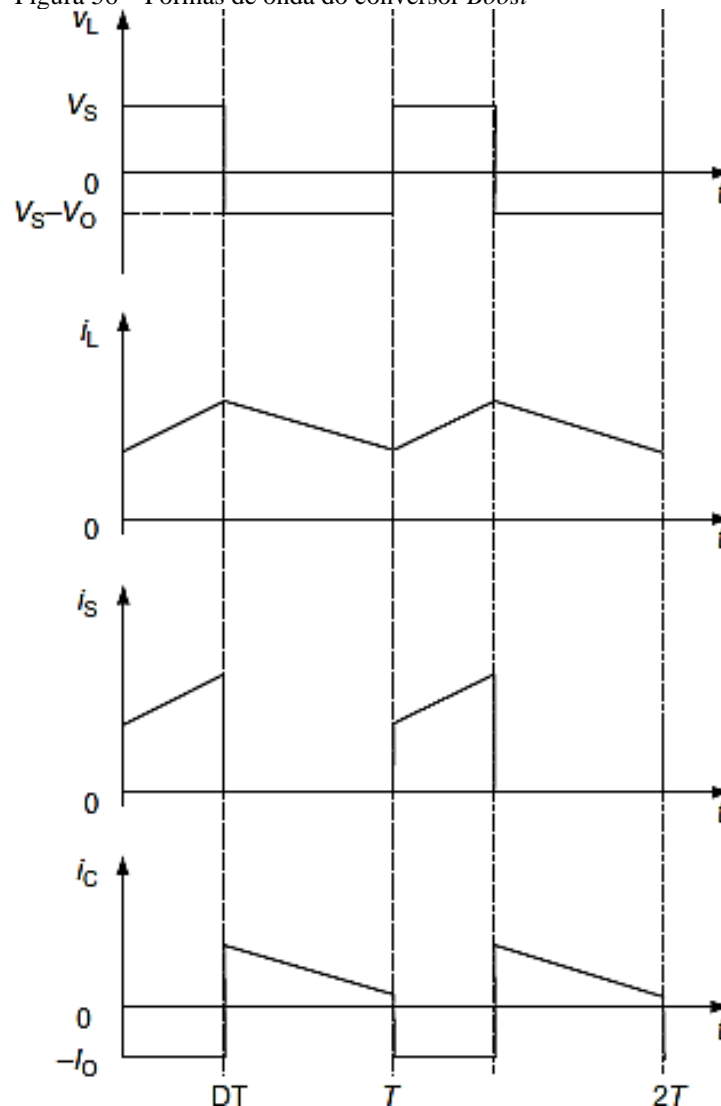
Assim como no conversor *Buck*, a chave  $S$  será comutada com frequência  $f$  e duração quando fechada  $DT$ . Com a chave fechada o diodo não está conduzindo e a corrente no indutor cresce linearmente. Ao alterar o estado da chave  $S$  para aberto, o diodo passa a estar polarizado diretamente e a energia armazenada no indutor é liberada para a carga. A relação entre entrada e saída é descrita na Equação 35 e a Figura 56 exibe as formas de onda desse circuito.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (35)$$

O valor mínimo para o indutor é definido através da Equação 36 e a capacitância  $C$  pode ter o seu valor mínimo calculado com a Equação 37 ou considerada alta o suficiente para negligenciar a flutuação de tensão na saída.

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 D}{2f} R \quad (36)$$

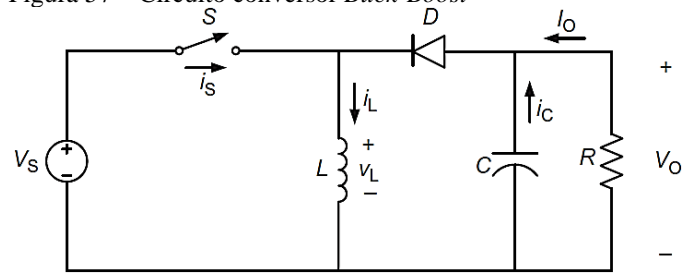
$$C_{min} = \frac{DV_o}{\Delta v_c R f} \quad (37)$$

Figura 56 – Formas de onda do conversor *Boost*

Fonte: RASHID, 2018, p. 277.

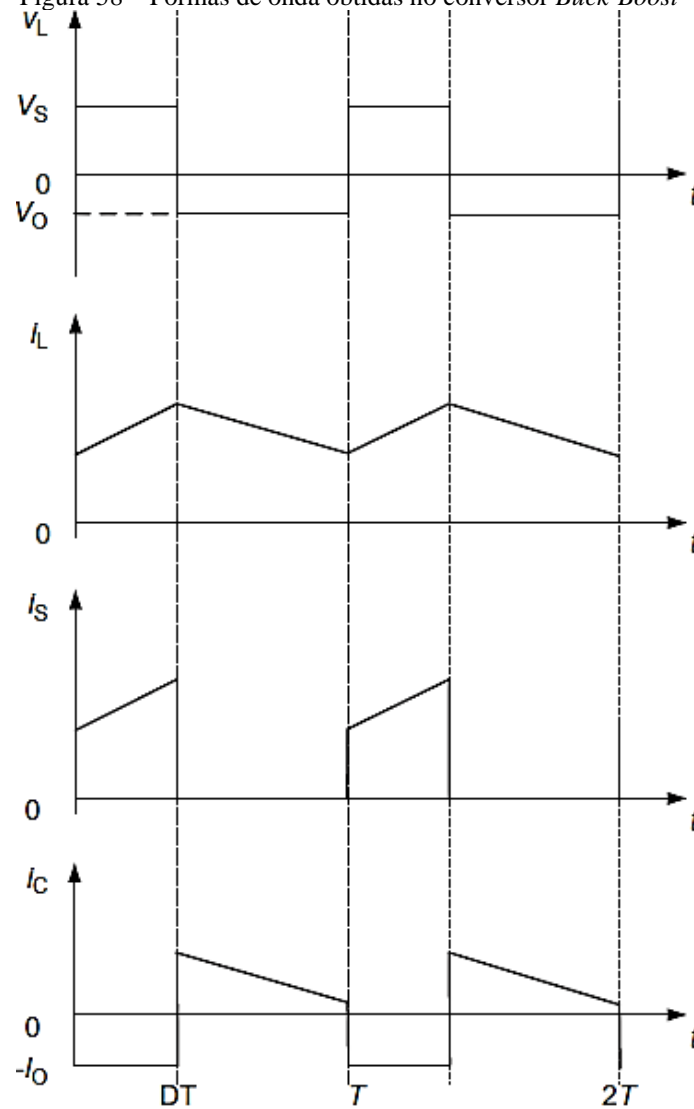
### 4.3. Conversor *Buck-Boost*

O conversor *Buck-Boost* é um circuito que agrega as funções dos circuitos anteriores, ou seja, é capaz de reduzir ou aumentar a tensão de entrada para um valor desejado na saída. A Figura 57 apresenta a descrição elétrica desse circuito que é composto com os mesmos elementos que os circuitos anteriores. A carga é representada pela resistência  $R$ ,  $V_S$  é a tensão de entrada,  $V_O$  a tensão de saída e a chave  $S$  é o elemento de chaveamento. Nesse circuito, além da amplitude da saída ser alterada, ela também é invertida com relação à entrada.

Figura 57 – Circuito conversor *Buck-Boost*

Fonte: RASHID, 2018, p. 281.

A duração do período que a chave  $S$  está fechada segue como  $DT$  e também tem frequência de chaveamento  $f$ . A Figura 58 exibe as formas de onda para o circuito acima.

Figura 58 – Formas de onda obtidas no conversor *Buck-Boost*

Fonte: RASHID, 2018, p. 281.

Com a chave fechada o diodo não está conduzindo e a corrente que flui no indutor aumenta, assim como sua energia armazenada. Quando a chave é aberta, o diodo fornece um caminho para a corrente do indutor, que agora será entregue a carga. A tensão de saída, que é a mesma no capacitor, é representada pela relação descrita na Equação 38.

$$V_o = V_c = \frac{D}{1-D} V_s \quad (38)$$

Para definir o valor mínimo do indutor é utilizada a Equação 39:

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2}{2} RT \quad (39)$$

A capacitância de  $C$  pode ser considerada alta o suficiente para negligenciar a flutuação de tensão na saída ou calculada através da Equação 40.

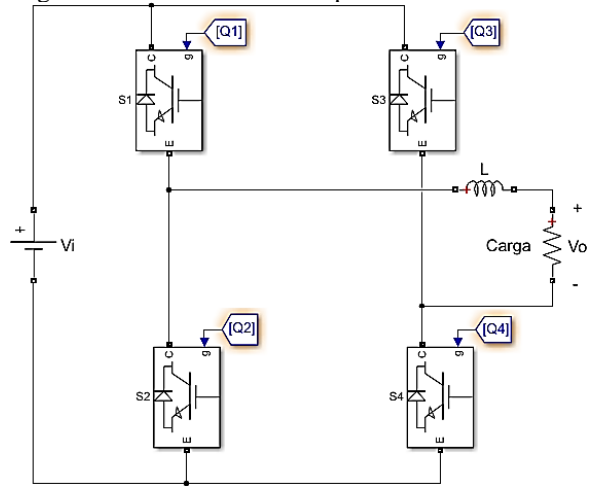
$$\Delta v_c = \frac{DTV_o}{RC} \Rightarrow C = \frac{DTV_o}{R\Delta v_c} \quad (40)$$

#### 4.4. Conversor CC-CA (Inversor)

A principal função desse circuito é produzir tensão alternada nos seus terminais de saída, a partir de uma entrada CC, com amplitude e frequência desejados, a fim de atender a demanda de cargas CA. Segundo Rashid (2018, p. 289), os inversores são construídos com dispositivos de chaveamento e diodos, que levam a geração de formas de onda com transições rápidas em vez de suaves, constituídas por uma componente fundamental que se comporta como uma onda senoidal pura e um número infinito de harmônicos.

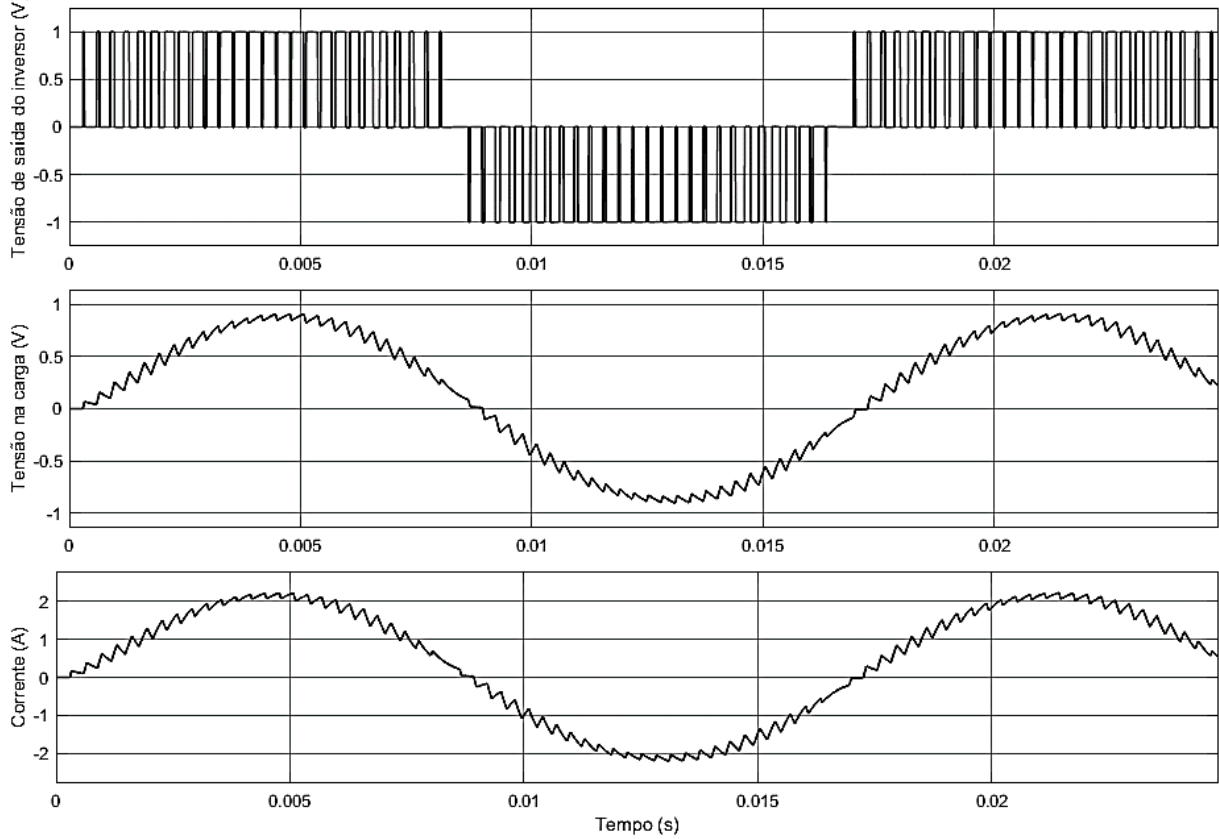
Existem diversos circuitos que realizam essa função e será apresentado o inversor ponte H monofásico, exibido na Figura 59 ligado à um indutor que atua como filtro, seguido de uma carga. No momento em que as chaves  $S1$  e  $S4$  estão fechadas e as chaves  $S2$  e  $S3$  abertas, a tensão na saída passa a ser igual a entrada  $V_i$ . Ao inverter os estados, a tensão na carga é  $-V_i$ . O período em que cada chave fica aberta ou fechada é definido por um sinal de frequência constante com alteração do período ativo, ou seja, modulado por pulsos, chamado de PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*). As formas de onda de tensão e corrente desse circuito são exibidas na Figura 60.

Figura 59 – Circuito Inversor ponte H



Fonte: O autor, 2020.

Figura 60 – Formas de onda inversor

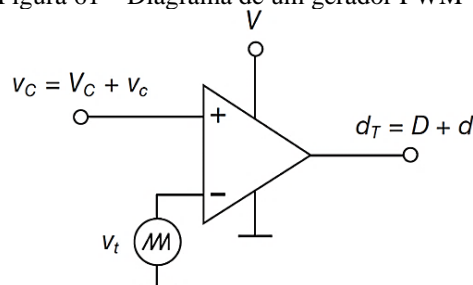


Fonte: O autor, 2020.

#### 4.5. Circuito gerador de modulação por largura de pulso (PWM)

Nos conversores apresentados a saída depende da duração em que cada dispositivo de chaveamento permanece aberto ou fechado. A geração desse sinal pode ser realizada através de um circuito de modulação por largura de pulso (PWM), apresentado na Figura 61, que tem o período ativo da saída contido no intervalo entre 0 e 1.

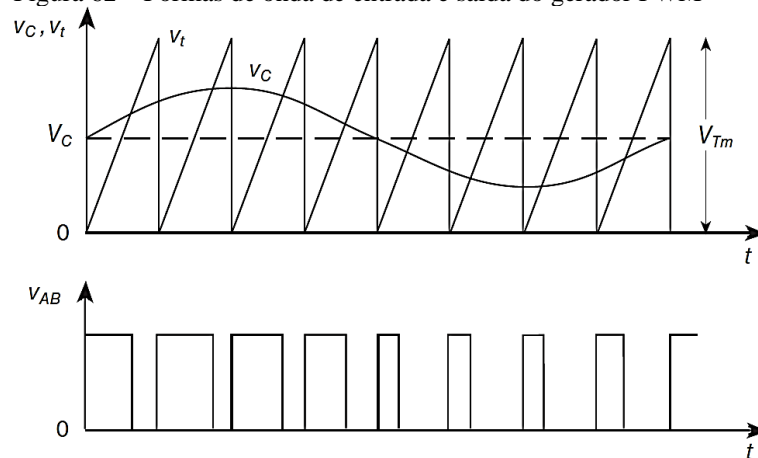
Figura 61 – Diagrama de um gerador PWM



Fonte: KAZIMIERCZUK, 2016, p. 480.

O circuito da Figura 61 compara o nível do sinal de referência com o de uma onda triangular e quando sua amplitude é igual ou maior que o nível de referência, a tensão da saída passa para zero e caso contrário, a saída é mantida com a tensão que representa seu nível alto. A saída é definida somente nesses dois níveis, que servem de sinal para a chave comutadora presente nos conversores. Na Figura 62 tem-se um exemplo que ilustra de forma gráfica as entradas e a saída do gerador PWM quando existe variação no sinal de referência.

Figura 62 – Formas de onda de entrada e saída do gerador PWM

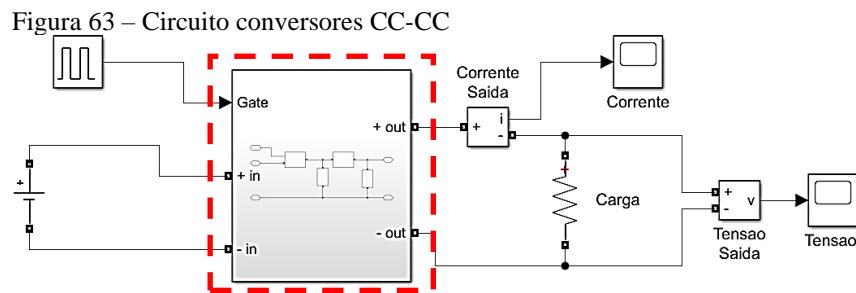


Fonte: KAZIMIERCZUK, 2016, p. 481.



#### 4.6. Implementação computacional

Os testes dos conversores CC-CC contaram com a estrutura apresentada na Figura 63, a qual teve no interior do bloco destacado o circuito relativo ao conversor projetado. A tensão de saída dos conversores CC ligados às fontes geradoras foi definida como 28,8 V, que é 20% acima do valor nominal da bateria (24 V), que será ligada ao barramento CC.



Fonte: O autor 2020.

A descrição do conversor *Buck* que será ligado ao sistema fotovoltaico conta com o dimensionamento dos componentes apresentados no item 4.1, começando pela razão cíclica que pode ser obtida resolvendo a Equação 32 para  $D$ , gerando a Equação 41.

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (41)$$

A tensão  $V_s$  será definida como o maior valor de tensão possível, pois assim será garantido que o conversor opere de forma segura para os demais valores de tensão produzidos. Segundo a Tabela 2, a tensão máxima que a associação de painéis é capaz de produzir é 64 V. Para estes valores, temos  $D$  conforme descrito a seguir.

$$D = \frac{28,8}{64} = 0,45$$

O valor mínimo do indutor, descrito na Equação 33, é calculado em função da frequência de chaveamento e da carga  $R$ . A resistência da carga pode ser definida a partir da potência máxima gerada que é 240 W e a frequência pode ser estipulada como 25 kHz, para evitar ruídos de chaveamento audíveis. Sendo assim, a indutância mínima será:

$$L_{min} = \frac{(1 - 0,45) 28,8^2}{2} \frac{1}{240 \cdot 25k} = 38,02 \mu\text{H}$$

O próximo elemento a ser definido é o capacitor, que pode ser calculado usando a Equação 34. Para esse cálculo foi definido que a variação de tensão na saída será de 0,1 V.

$$C = \frac{(1 - 0,45) \cdot 28,8}{8 \cdot 38,02 \mu \cdot 0,1 \cdot (25 k)^2} = 0,83 mF$$

No caso do sistema eólico, o gerador tem a tensão de saída em função da rotação de seu eixo e, dependendo da velocidade do vento, a tensão de saída pode ser inferior ou superior ao encontrado no barramento CC, sendo necessário utilizar um conversor *Buck-Boost*, o qual tem o dimensionamento dos componentes apresentados no item 4.3. A tensão  $V_S$  utilizada nesse caso será de 36 V, pois o controle de *pitch* não permitirá que o gerador chegue em velocidades que gerem tensões maiores que a nominal. A razão cíclica desse conversor pode ser obtida a partir da Equação 38, gerando a Equação 42.

$$D = \frac{V_o}{V_s + V_o} \quad (42)$$

Com os valores das tensões de entrada e saída definidos, temos:

$$D = \frac{28,8}{36 + 28,8} = 0,444$$

O cálculo do indutor e do capacitor são realizados através das Equação 39 e 40 respectivamente, e o resultado é apresentado abaixo, utilizando a potência de 250 W descrita na Tabela 6. Definindo a variação de tensão na saída como de 0,5 V, os componentes serão:

$$L_{min} = \frac{(1 - 0,44)^2 \cdot 28,8^2 \cdot 1}{2 \cdot 240 \cdot 25k} = 20,48 \mu H$$

$$C = \frac{0,44 \cdot 28,8 \cdot 240 \cdot 1}{0,1 \cdot 28,8^2 \cdot 25k} = 0,31 mF$$

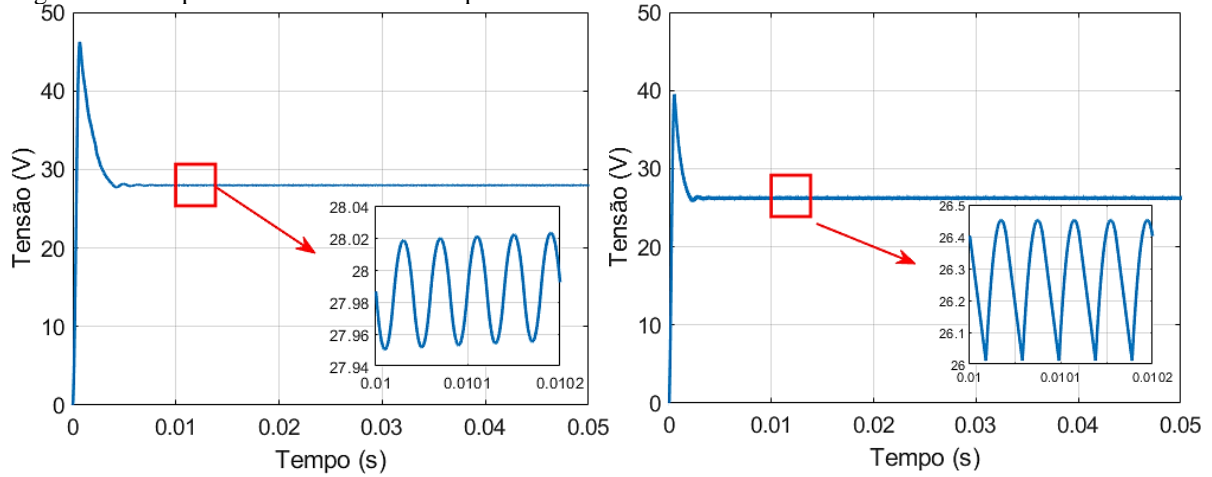
Para simular a implementação destes dois conversores foram utilizados valores comerciais ligeiramente superiores aos calculados a fim de atender as especificações estabelecidas. Os componentes usados estão listados na Tabela 7 e as formas de onda das tensões de saída dos dois conversores são exibidas na Figura 64.

Tabela 7 – Parâmetros dos conversores ligados às fontes

<b>Conversor</b>	<b>Indutor</b>	<b>Capacitor</b>
<i>Buck</i> solar	47 $\mu H$	1 mF
<i>Buck-Boost</i> eólico	24 $\mu H$	360 $\mu F$

Fonte: O autor 2020.

Figura 64 – Resposta dos conversores CC para sistema fotovoltaico e eólico



Fonte: O autor 2020.

No dimensionamento do conversor *Boost* foram usadas as equações descritas no item 4.2. Esse conversor é responsável por elevar a tensão do barramento CC para 200 V, que será a entrada do inversor. Sua razão cíclica pode ser obtida resolvendo a Equação 35 para  $D$ , gerando a Equação 43.

$$D = \frac{1 - V_s}{V_o} \quad (43)$$

Sua tensão de saída foi definida como 200 V e com isso o valor de  $D$  será:

$$D = \frac{1 - 28,8}{220} = 0,856$$

O indutor descrito na Equação 36 é calculado em função da frequência de chaveamento e da carga  $R$ . Estipulando uma potência consumida estipulada de 480 W, temos:

$$L_{min} = \frac{(1 - 0,856)^2 \cdot 0,856 \cdot 200^2}{2 \cdot 25k} \cdot \frac{200^2}{480} = 29,58 \mu\text{H}$$

O capacitor pode ser calculado através da Equação 37. Para esse cálculo foi definido que a variação de tensão na saída será de 0,1 V.

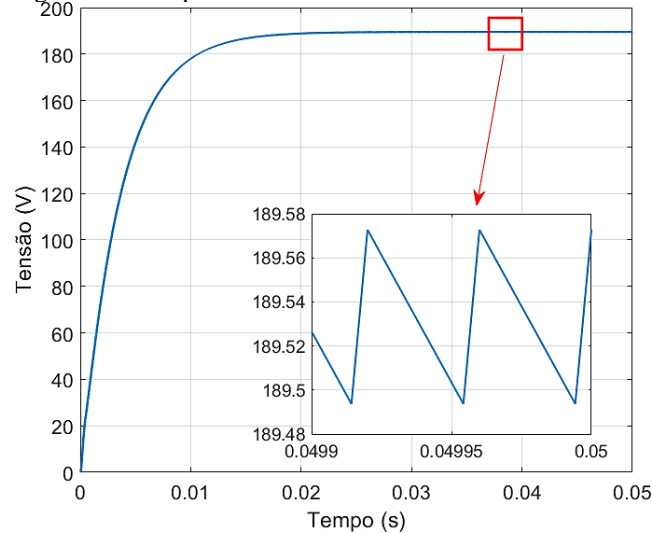
$$C = \frac{0,856 \cdot 200}{0,01 \cdot \frac{200^2}{480} \cdot 25k} = 0,82 \text{ mF}$$

Os componentes para o conversor *Boost* utilizado na simulação estão descritos na Tabela 8 e a tensão de saída é apresentada Figura 65 .

Tabela 8 – Parâmetros do conversor *Boost*

Conversor	Indutor	Capacitor
<i>Boost</i>	33 $\mu$ H	1 mF

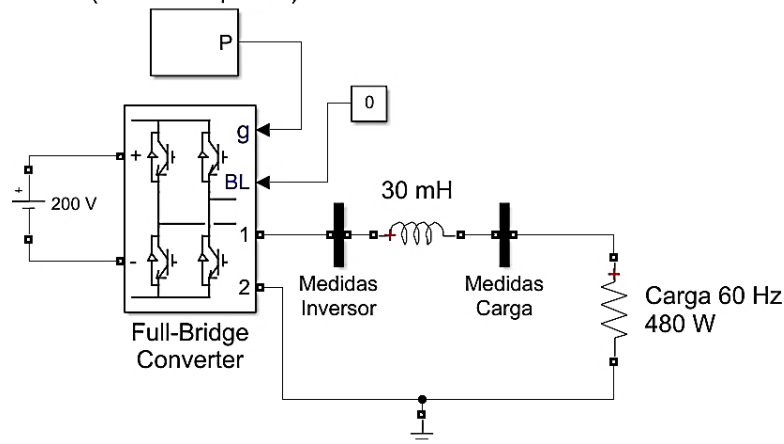
Fonte: O autor 2020.

Figura 65 – Resposta do conversor *Boost*

Fonte: O autor 2020.

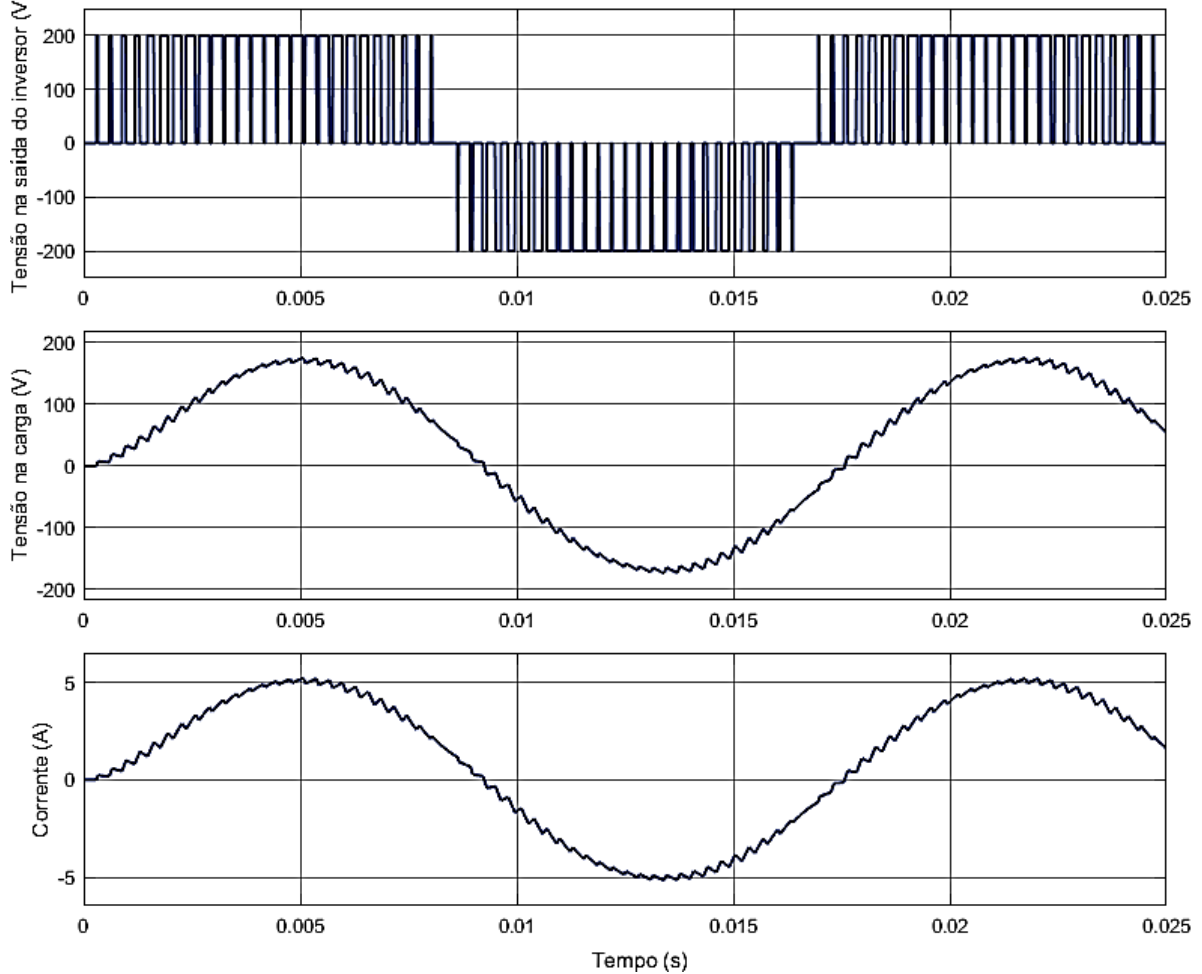
Para simulação do inversor foram realizadas as ligações apresentadas na Figura 66, que apresenta dois blocos fundamentais: a ponte inversora (*Full-Bridge Converter*) e o gerador PWM (*PWM Generator*). O bloco PWM foi utilizado com suas configurações padrões e os resultados obtidos são apresentados na Figura 67, com a corrente que flui por seus terminais e as tensões na saída e na carga.

Figura 66 – Implementação do circuito inversor no *Simulink*  
 PWM Generator  
 (2-Level - 4 pulses)



Fonte: O autor 2020.

Figura 67 – Resultados da simulação do circuito inversor



Fonte: O autor 2020.

É possível notar que a flutuação de tensão em regime permanente ficou com um pouco abaixo do esperado em todos os conversores CC-CC, provavelmente por conta da queda de tensão nos diodos e das resistências internas dos dispositivos semicondutores utilizados. Entretanto, a amplitude obtida continua atendendo os objetivos do projeto, bastando apenas uma pequena alteração no ciclo de trabalho para chegar aos valores desejados e, por isso, esses conversores serão usados na aplicação dos MPPTs no capítulo seguinte.

## 5. MAXIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA PRODUZIDA

Para maximizar a energia produzida através das diferentes fontes do sistema de microgeração, pode-se utilizar diversas técnicas de otimização, as quais podem ser divididas em duas classes por conta do tipo de implementação empregado. A primeira é realizada através de mecanismos que alteram a posição da fonte geradora, direcionando o painel para a posição com maior incidência de raios solares ou as pás da turbina para que tenha um melhor aproveitamento aerodinâmico. A outra forma é através de algoritmos de busca que modificam a maneira pela qual a fonte entrega energia a carga, fazendo-a operar no seu ponto de máxima potência.

O aproveitamento máximo pode ser obtido com a união dessas duas formas, entretanto, na maior parte das aplicações somente uma delas é empregada. Neste trabalho são comparadas quatro técnicas relacionadas ao segundo grupo, com algoritmos de busca do ponto de máxima potência (MPPT), com o objetivo de definir aquela que será implementada em cada uma das fontes no sistema de microgeração híbrido. Para Sumathi, Kumar e Surekha (2015, p. 115), há onze técnicas de MPPT que dominam os campos de aplicação. Tais técnicas são enumeradas a seguir, sendo as quatro aqui avaliadas destacadas em negrito.

### **1. Perturbar e Observar (P&O)**

### **2. Método de Condutância Incremental**

3. Corrente de curto-circuito fracionária

4. Tensão de circuito aberto fracionária

### **5. Lógica difusa (Fuzzy)**

### **6. Redes neurais artificiais**

7. Controle de Correlação de Ondulação

8. Varredura atual

9. Controle de inclinação do capacitor de link CC

10. Corrente de carga ou maximização da tensão de carga

11. Controle de feedback  $dP/dV$  ou  $dP/dI$

As técnicas destacadas são detalhadas nas seções que seguem, sendo as duas primeiras amplamente usadas e consideradas simples de implementar e as outras duas mais sofisticadas,

ligadas a área de *soft computing*. Todos os quatro métodos possuem boa eficiência quando aplicados em sistemas solares (VERMA, NEMA, *et al.*, 2016, p. 1031) e eólicos (SACHAN, GUPTA e SAMUEL, 2016, p. 386), sendo as formas mais complexas mais rápidas, porém com mais alto custo de implementação.

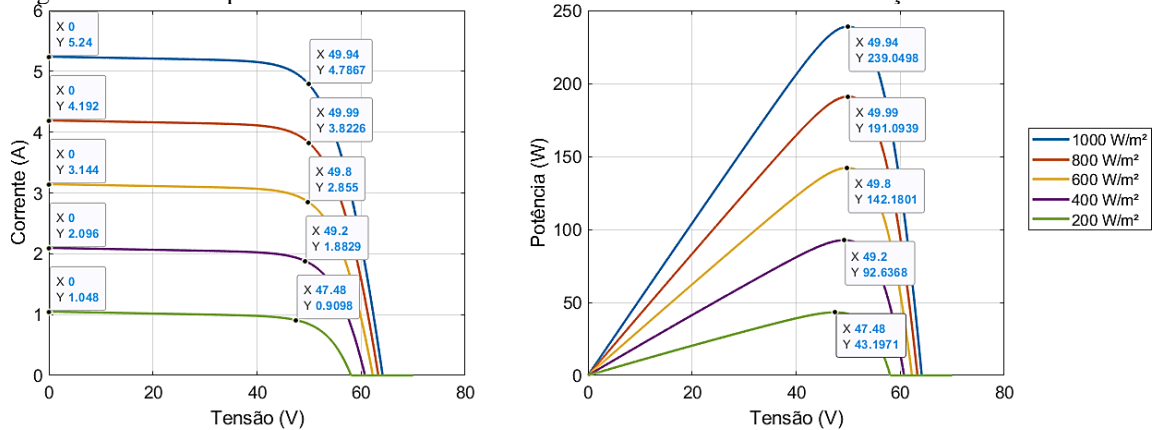
A avaliação e comparação dos métodos testados são realizadas no item 5.6, ao final do capítulo, e as estruturas internas dos blocos de controle elaborados e utilizados nas simulações são apresentadas no Anexo F – Descrição em blocos dos algoritmos de controle utilizados.

### 5.1. Definição da estratégia de controle

A definição da estratégia de controle das técnicas de busca pela maximização da energia produzida apresentada a seguir é fundamentada nas curvas de potência das fontes geradoras. Em todos os casos a curva de potência contém somente um máximo local por condição de operação, podendo ser alcançado de acordo com a tensão do painel ou da turbina eólica.

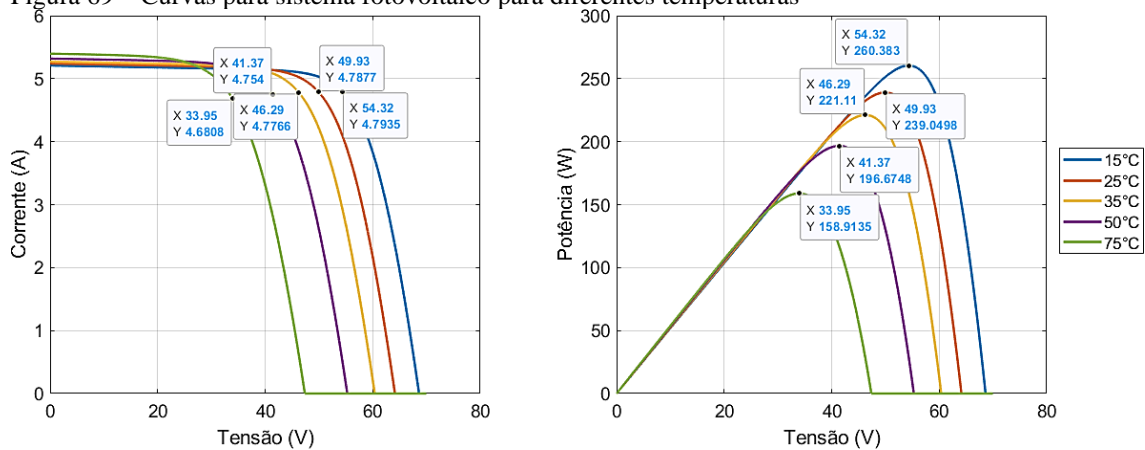
No sistema fotovoltaico, variações de temperatura ou de densidade de radiação podem alterar o ponto de máxima potência. As curvas características do sistema montado com a associação de painéis descrita no item 3.5, exibidas na Figura 68 e na Figura 69, mostram que a máxima produção energética é obtida em um ponto específico de tensão e corrente, que é deslocado de acordo com as condições ambientais.

Figura 68 – Curvas para sistema fotovoltaico com diferentes densidades de irradiação



Fonte: O autor, 2020.

Figura 69 – Curvas para sistema fotovoltaico para diferentes temperaturas

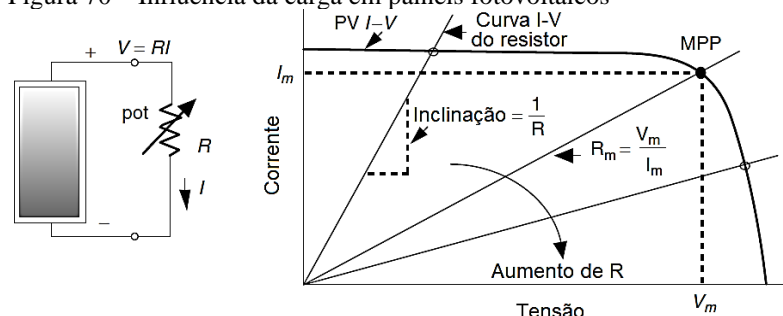


Fonte: O autor, 2020.

Nota-se que mudanças na densidade de irradiação alteraram diretamente o valor da corrente, enquanto o ponto de tensão de máxima potência permanece quase o mesmo. O inverso ocorre quando há alteração na temperatura, onde a corrente é pouco afetada, diferente das tensões de máxima potência e de circuito aberto.

O modelo elétrico apresentado no item 2.5 mostra que o painel solar é basicamente uma fonte de corrente e, sendo assim, a tensão de saída depende da carga que o sistema alimenta. A Figura 70 exhibe um circuito ligado a uma carga resistiva variável, ao lado da sua curva de corrente por tensão teórica junto a curva de tensão da carga resistiva. Supondo que as condições ambientais (irradiação e temperatura) são mantidas constantes, ao alterar a resistência do potenciômetro o ponto de operação representado pelo cruzamento das duas curvas é deslocado. O ponto onde o painel tem um maior aproveitamento da energia gerada, marcado como MPP, é o local desejado de operação, entretanto, mesmo que esse painel seja usado para alimentar uma carga que tenha o valor encontrado nessa análise, não é garantido que o sistema opere sempre no ponto de máxima transferência de potência, pois, em uma aplicação real, as condições ambientais são alteradas constantemente.

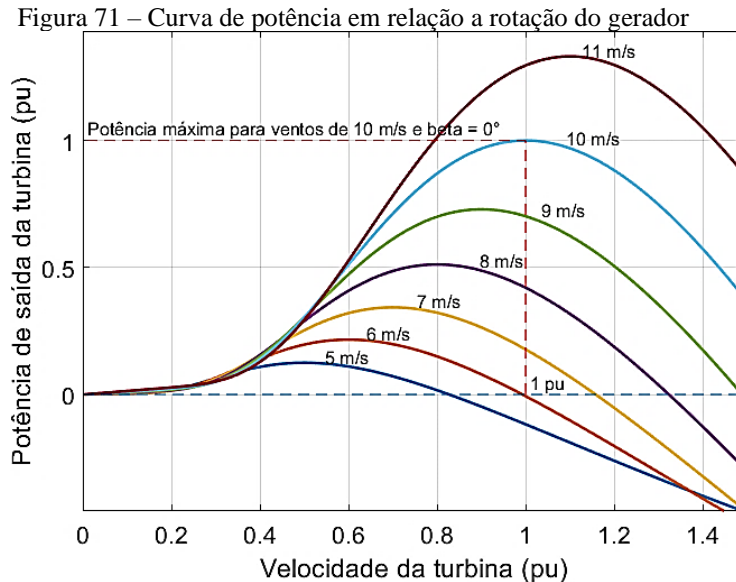
Figura 70 – Influência da carga em painéis fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de MASTERS, 2004, p. 509.



Para o sistema eólico, a curva avaliada é a de potência produzida em relação à rotação do gerador, tornando necessário adequar tal parâmetro para que o ponto de operação seja mantido no máximo da curva, independentemente da intensidade de vento. Essa curva é apresentada no gráfico da Figura 71.



A relação do torque com a potência e a velocidade da turbina, segundo Heier (2014, p. 40), é descrita conforme Equação 44. Alterando a posição dos termos, é possível calcular a potência em função do torque e da velocidade, conforme a Equação 45.

$$T_m = \frac{P_{turbina}}{w} \quad (44)$$

$$P_{turbina} = T_m \cdot W \quad (45)$$

A corrente e a tensão do gerador CC com ímã permanente obedecem as relações apresentadas por Fitzgerald, Kingsley e Umans (2014, p. 440), reproduzidas a seguir. Através delas fica evidente que o ponto de operação da turbina pode ser ajustado através de alterações na carga entregue ao gerador, que é exatamente a intervenção realizada pelos métodos apresentados a seguir.

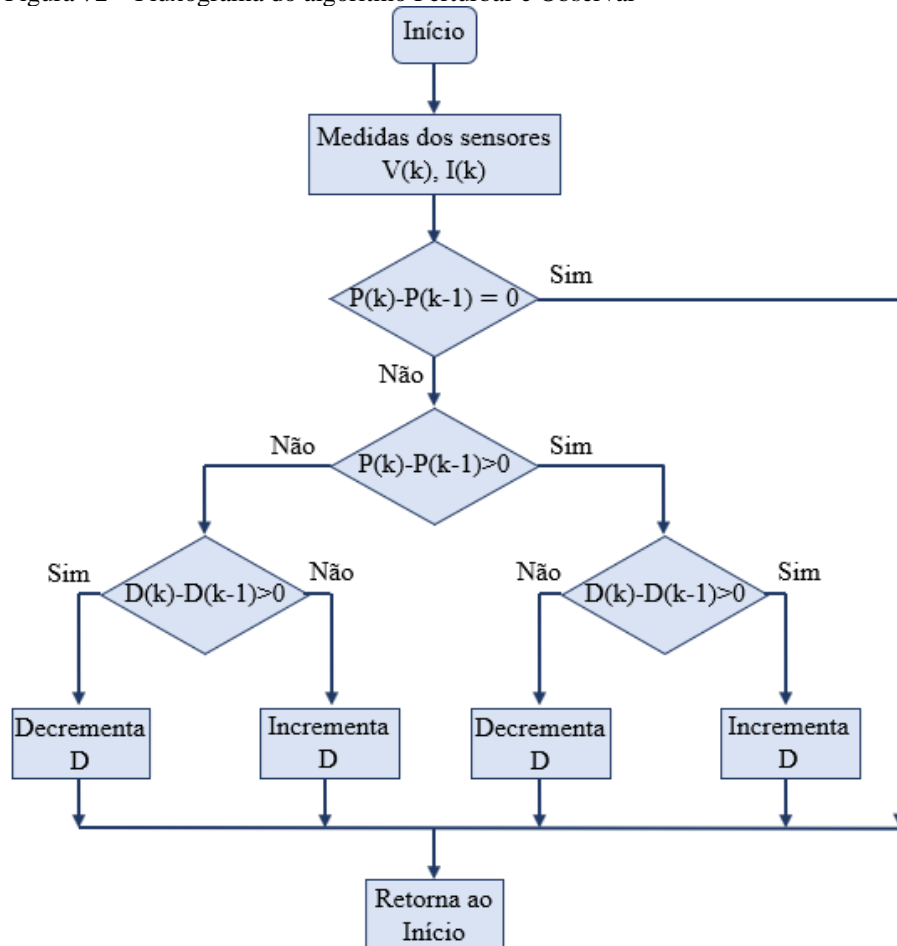
$$T_{mec} = K_m I_a$$

$$V_{motor} = K_m w_m \quad (46)$$

## 5.2. Perturbar e Observar (P&O)

Esse método tem como principais pontos positivos a fácil aplicação física e o baixo esforço computacional exigido. Seu funcionamento básico consiste em um processo iterativo, o qual realiza medidas, compara a potência atual com a anterior e realiza alterações na variável de ajuste, fazendo com que o ponto de operação oscile em torno do ponto de potência máximo (SHAH, GAUR, *et al.*, 2015, p. 48). O fluxograma que ilustra essa técnica é apresentado na Figura 72.

Figura 72 – Fluxograma do algoritmo Perturbar e Observar



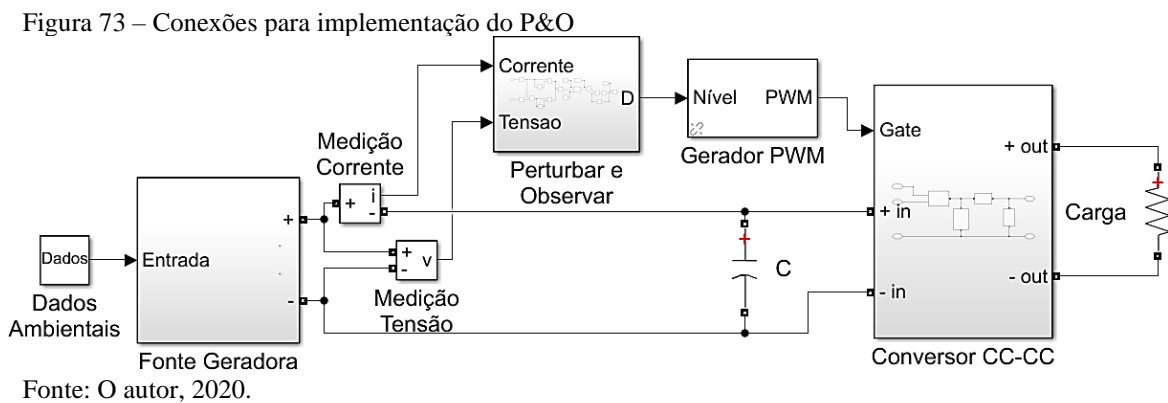
Fonte: o autor, 2020.

Como o próprio nome sugere, o ponto de operação sofre sucessivas perturbações e, dependendo do resultado, aumenta ou diminui o valor da razão cíclica  $D$ . Esse processo acontece a todo instante e cada alteração em  $D$  gera uma mudança de potência, mesmo que pequena, e faz com que a razão cíclica seja alterada novamente. Os ajustes seguem com o

mesmo sinal enquanto a potência aumenta e ao chegar em um ponto onde a potência começa a reduzir, os ajustes mudam de sentido.

### 5.2.1. Implementação computacional

As conexões necessárias para implementar a técnica de busca P&O nos sistemas descritos são exibidas na Figura 73. O bloco “Perturbar e Observar” contém a realização do método de busca, que tem como entrada a tensão e corrente medidas na fonte geradora.



As curvas de potência e tensão do sistema fotovoltaico com a utilização do método P&O para densidade de irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  são exibidas na Figura 74. A Figura 75 apresenta a potência produzida para diferentes condições, com irradiações de  $1000, 800, 600, 400$  e  $200 \text{ W/m}^2$ , todas com temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

Figura 74 – Potência e tensão do sistema fotovoltaico com MPPT P&O

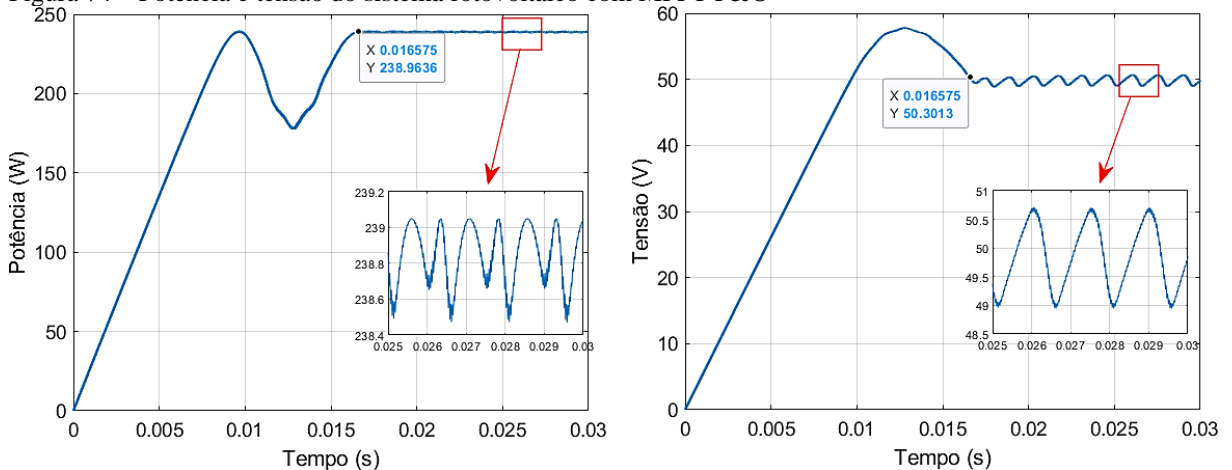
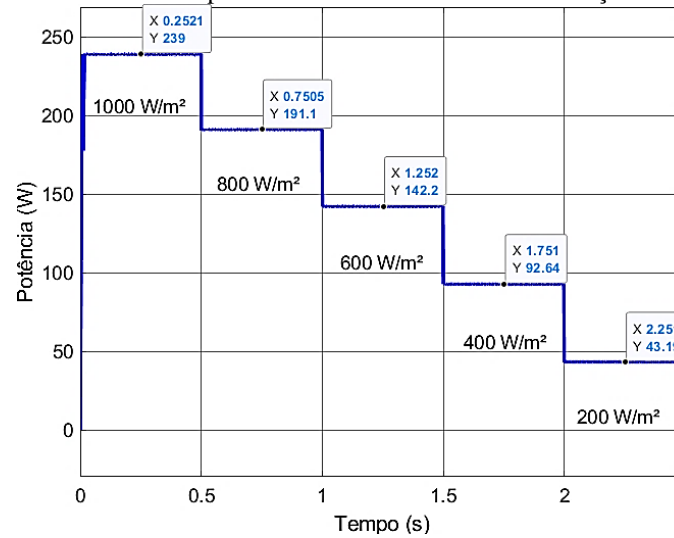


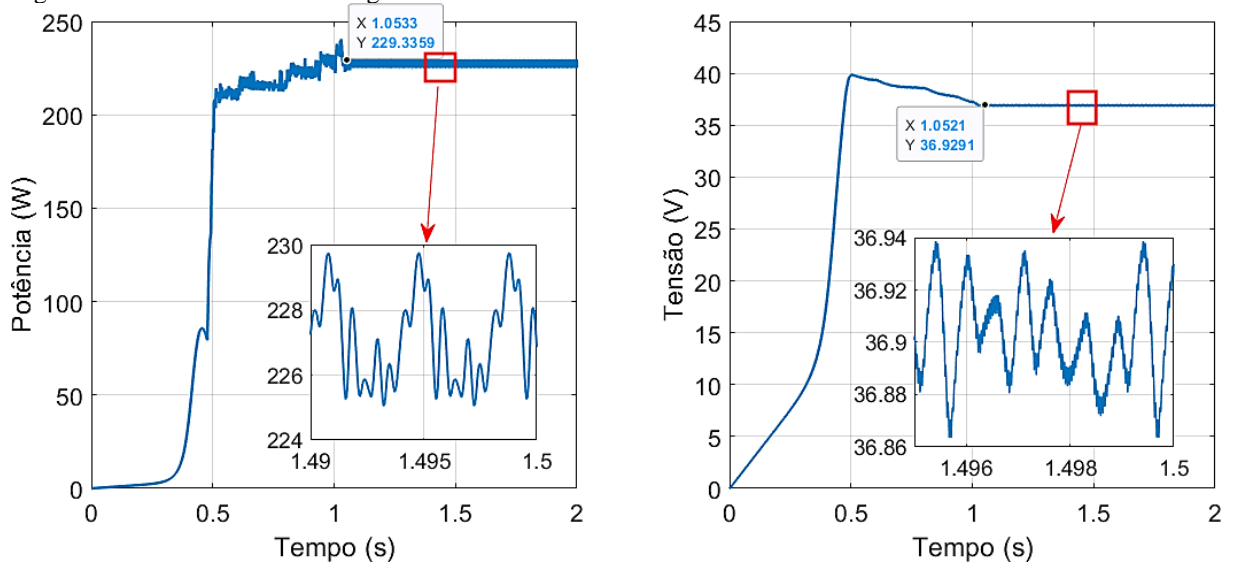
Figura 75 – Potência do sistema fotovoltaico com MPPT P&O para diferentes densidades de irradiação



Fonte: O autor, 2020.

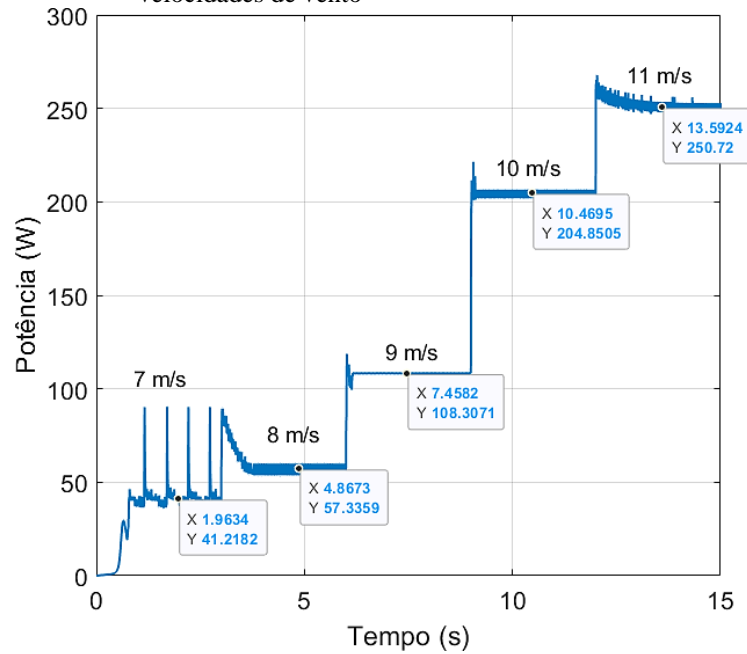
Os resultados da aplicação desse método no sistema eólico são exibidos na Figura 76, com a curva de potência e tensão para vento com velocidade de 10 m/s, na Figura 77, com a curva de potência para ventos de 7, 8, 9, 10 e 11 m/s.

Figura 76 – Potência e tensão do gerador eólico com MPPT P&O



Fonte: O autor, 2020.

Figura 77 – Potência do sistema eólico com MPPT P&O para diferentes velocidades de vento

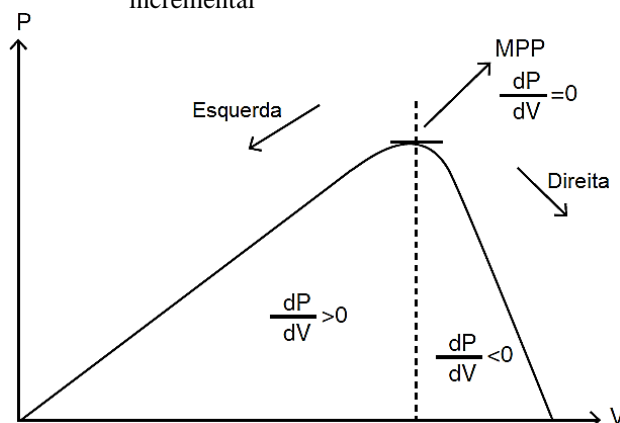


Fonte: O autor, 2020.

### 5.3. Condutância Incremental

No método Condutância Incremental (CI), a tensão terminal é ajustada de acordo com a com a condutância incremental e instantânea do módulo, obtida no ponto inflexão da curva de potência, onde sua derivada é nula, conforme pode ser visto na Figura 78 (RAM, RAJASEKAR e MIYATAKE, 2017, p. 1145).

Figura 78 – Ideia básica do método condutância incremental



Fonte: Adaptado de SUMATHI, KUMAR e SUREKHA, 2015, p. 117.

O valor de ajuste é obtido derivando a potência para identificar se a tendência da curva é crescente, decrescente ou nula. Seu desenvolvimento é apresentado a seguir, começando com a definição de potência, seguido da busca pelo ponto de inversão de sentido da curva.

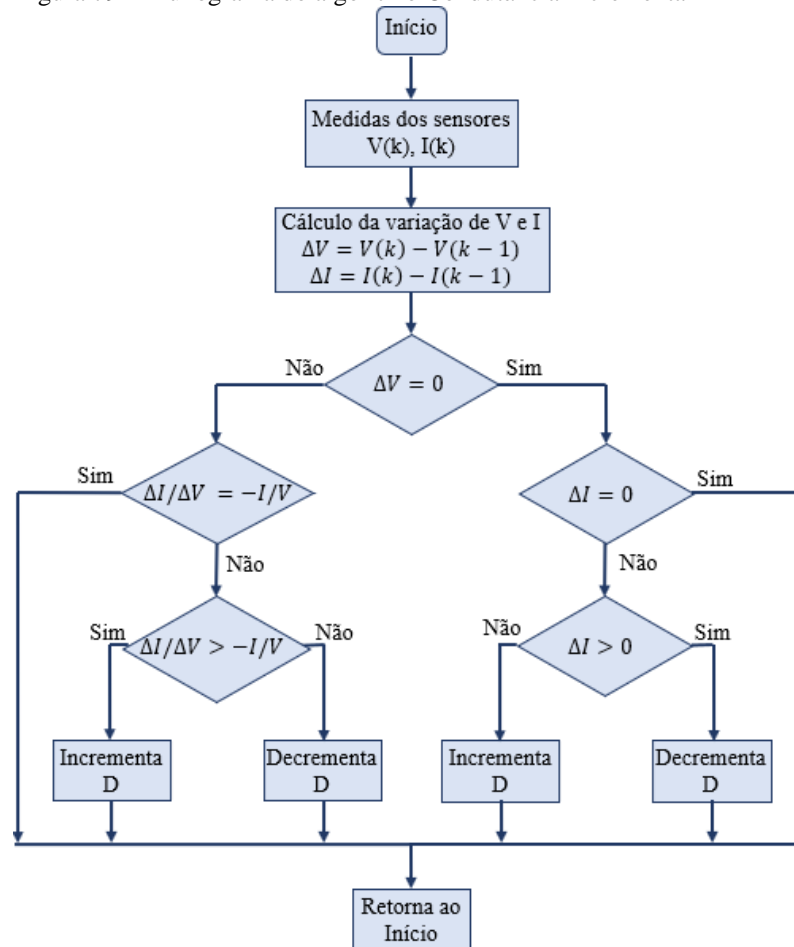
$$P = V \times I$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

O fluxograma que ilustra esse método de otimização é descrito na Figura 79. As relações com o ponto de máxima potência são apresentadas na Tabela 9, a qual tem à esquerda das equações a condutância incremental e à direita a condutância instantânea.

Figura 79 – Fluxograma do algoritmo Condutância Incremental



Fonte: O autor 2020.

Tabela 9 – Característica do método de Condutância Incremental

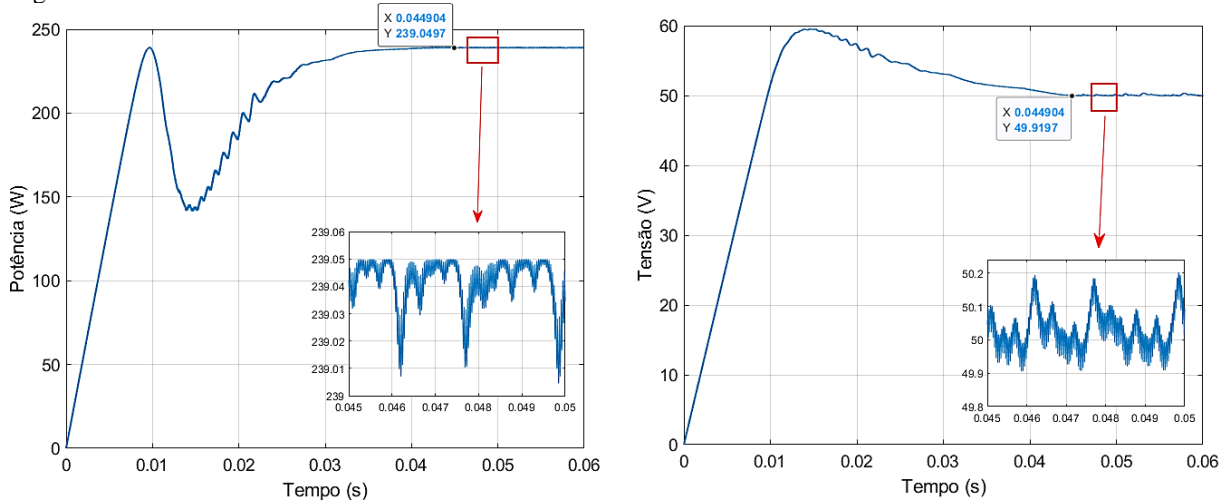
Característica	Posição
$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$	À esquerda do MPP
$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$	No MPP
$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$	À direita do MPP

Fonte: O autor 2020.

### 5.3.1. Implementação computacional

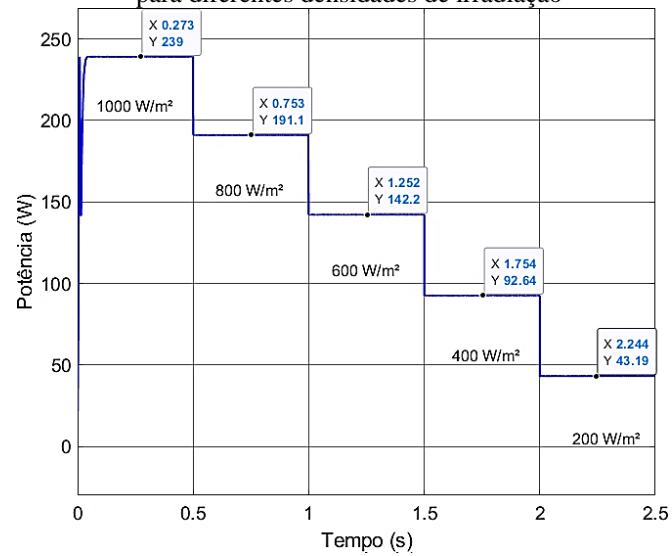
As ligações do controlador com os demais componentes são similares ao realizado com o MPPT anterior e exibidas na Figura 73, alterando somente o interior do bloco de busca para conter a descrição do método Condutância Incremental. Os resultados da aplicação dessa técnica de rastreamento ao sistema fotovoltaico são exibidos na Figura 80 com o gráfico de potência e tensão para irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C. A Figura 81 contém as curvas de potência para irradiações de 1000, 800, 600, 400 e 200 W/m<sup>2</sup>, todas na temperatura de 25°C.

Figura 80 – Potência e tensão do sistema fotovoltaico com MPPT Condutância Incremental



Fonte: O autor, 2020.

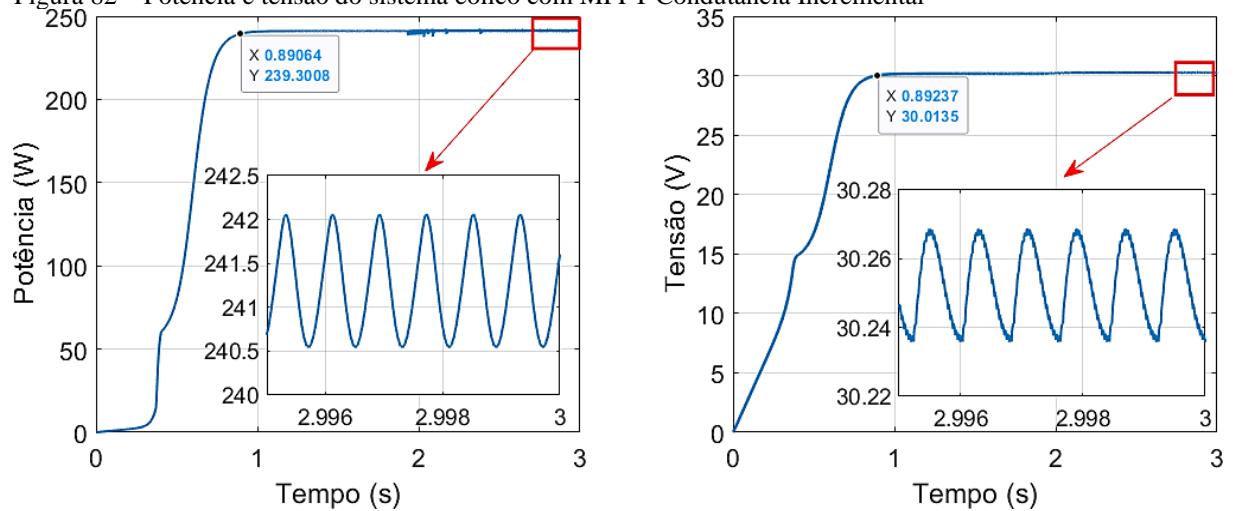
Figura 81 – Potência do sistema fotovoltaico com MPPT CI para diferentes densidades de irradiação



Fonte: O autor, 2020.

Os resultados obtidos quando aplicados ao sistema eólico são apresentados na Figura 82, com as curvas de potência e tensão para vento com velocidade de 10 m/s. Em seguida, na Figura 83, são exibidas as curvas de potência para ventos de 11, 10, 9, 8 e 7 m/s.

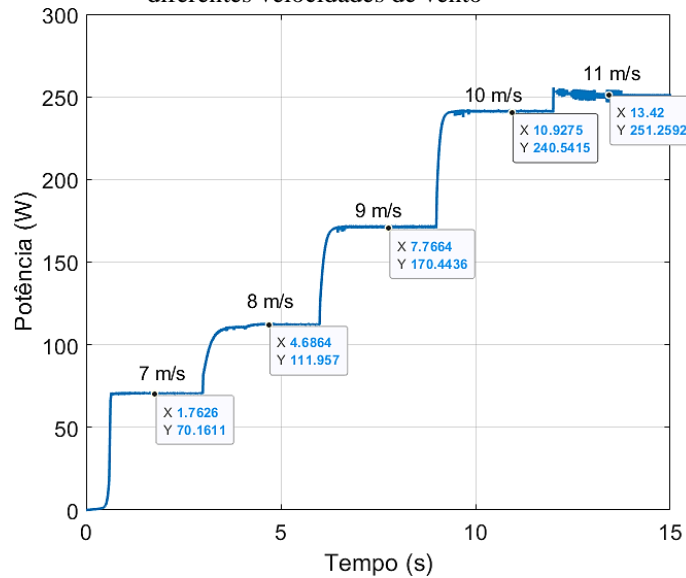
Figura 82 – Potência e tensão do sistema eólico com MPPT Condutância Incremental



Fonte: O autor, 2020.



Figura 83 – Potência do sistema eólico com MPPT CI para diferentes velocidades de vento



Fonte: O autor, 2020.

#### 5.4. Lógica difusa

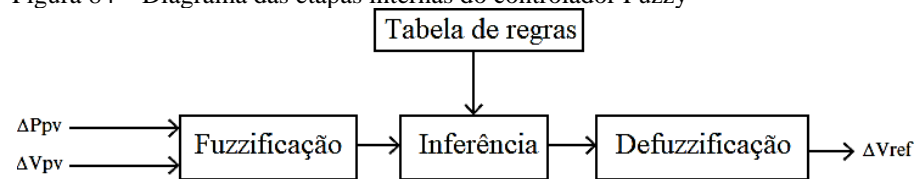
A lógica difusa, ou lógica Fuzzy, é uma lógica multivalorada, ou seja, vai além da definição de verdadeiro ou falso, 0 ou 1, possuindo diversos níveis entre esses dois e costumam lidar com sistemas de pouca precisão ou com informações vagas. Esse tipo de lógica trabalha com o conceito de verdade parcial, em que o valor real está entre o completamente verdadeiro e o completamente falso (CHAKRAVERTY, SAHOO e MAHATO, 2019, p. xix).

O valor das variáveis pode ser definido linguisticamente, usando termos etimológicos para classificar faixas de valores, tornando o ajuste do controlador mais simples, qualitativamente, como por exemplo descrevendo uma temperatura como *quente*, *morna* ou *fria*. Segundo Sumathi, Kumar e Surekha (2015, p. 121), a aplicação lógica difusa pode ser dividida em três etapas, apresentadas a seguir e exibidas na Figura 84.

- Fuzzificação – Nessa etapa as variáveis de entrada são convertidas em variáveis linguísticas de acordo com a função de associação de um conjunto difuso. Ao passar por essa etapa, cada valor passa a ter um determinado grau de pertencimento ao grupo associado, definido por uma função de pertinência. A quantidade de níveis dependerá da aplicação e pode ser diferente de uma entrada para outra.

- Tabela de regras – São as regras que definem o que acontecerá quando determinada situação ocorrer.
- Defuzzificação – É a etapa que converte o resultado obtido através da lógica Fuzzy e que está descrito através de uma variável linguística em um valor, de acordo com o grau de pertencimento ao grupo. A quantidade de níveis dessa etapa não precisa ser igual a entrada.

Figura 84 – Diagrama das etapas internas do controlador Fuzzy



Fonte: Adaptado de SUMATHI, KUMAR e SUREKHA, 2015, p. 149.

O algoritmo Fuzzy rastreia a potência máxima com base em um raciocínio similar aos algoritmos anteriores, ou seja, caso a última alteração na variável de controle aumente a potência, as alterações continuam no mesmo sentido; caso contrário, se a potência for reduzida, os ajustes seguem direção oposta. Apesar disso, esse método permite realizar ajustes com amplitudes diferentes entre eles, possibilitando encontrar um ponto de operação mais estável. É importante destacar que, no caso apresentado, a busca utilizando esse método aponta incrementos e decrementos no ciclo de trabalho do conversor CC-CC, sem indicar o valor exato a ser adotado.

Conforme apresentado em Reddy e Ramasamy (2017, p. 4), a aplicação do controlador lógico difuso é dada em função das Equações 47 e 48, que calculam o erro (E) do ponto atual com o anterior e a variação desse erro ( $\Delta E$ ), respectivamente.

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)} \quad (47)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (48)$$

A descrição geral desse controlador serve para ambos os sistemas apresentados, eólico e fotovoltaico. O conjunto etimológico usado para as variáveis de entrada e saída são iguais e possuem os seguintes termos: Muito Negativo (MN), Pouco Negativo (PN), Zero (Z), Pouco Positivo (PP), Muito Positivo (MP). No total são 25 regras, apresentadas na Tabela 10.

A tabela de regras adotada para entradas e saída é apresentada na Figura 85 e o sistema de inferência utilizado como padrão pela ferramenta do *Matlab* é o de Mamdani. Esse método utiliza operações *max-min*, adotando a aplicação mínimo para o conceito lógico “e” e o máximo para “ou” com estruturas do tipo: *se* variável 1 *é* x *e* variável 2 *é* y *então* resultado. Para saída, o método de defuzzificação usado é o centroide (ou centro de gravidade) que tem como resultado a média das áreas de todas as figuras que representam os graus de pertinência de um subconjunto fuzzy. Segundo o guia de uso da ferramenta (THE MATHWORKS, INC., 2020, p. 2-2), os principais pontos positivos dessa abordagem são:

- Têm ampla aceitação;
- Adequado para definições de entrada com interpretação humana;
- Base de regras facilmente interpretável;
- Intuitivo.

Tabela 10 – Tabela de regras para lógica difusa

	MN	PN	Z	PP	MP
MN	Z	Z	MN	MN	MN
PN	Z	Z	PN	PN	PN
Z	PN	Z	Z	Z	PP
PP	PP	PP	PP	Z	Z
MP	MP	MP	PB	Z	Z

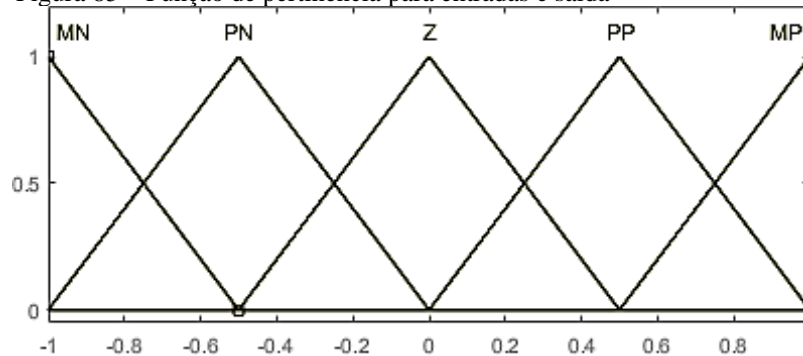
Variável 1 (E)

Variável 2 ( $\Delta E$ )

Resultado

Fonte: O autor 2020.

Figura 85 – Função de pertinência para entradas e saída



Fonte: O autor 2020.

Como as funções de associação criadas variam entre -1 e 1, é necessário inserir ganhos de sintonia adequados para cada uma delas, descritos por  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  nas equações que representam a variação das entradas ( $\Delta E_1$  e  $\Delta E_2$ ) e da saída ( $\Delta S$ ) a seguir.

$$\Delta E_1 = [E_1(k) - E_1(k - 1)] \times k_1$$

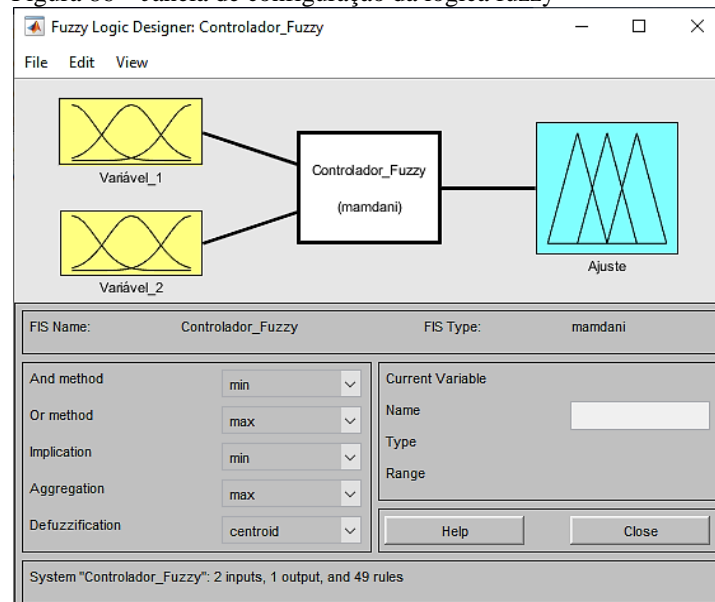
$$\Delta E_2 = [E_2(k) - E_2(k - 1)] \times k_2$$

$$\Delta S = [S(k) - S(k - 1)] \times k_3$$

#### 5.4.1. Implementação computacional

A implementação dessa técnica utiliza a ferramenta *Fuzzy Logic toolbox* do *MATLAB* para criar o controlador Fuzzy. Ao entrar com o comando *Fuzzy*, a janela referente à ferramenta é aberta, na qual podem ser inseridas as funções de associação e a tabela de regras para entradas e saída descritas anteriormente (Figura 86).

Figura 86 – Janela de configuração da lógica fuzzy

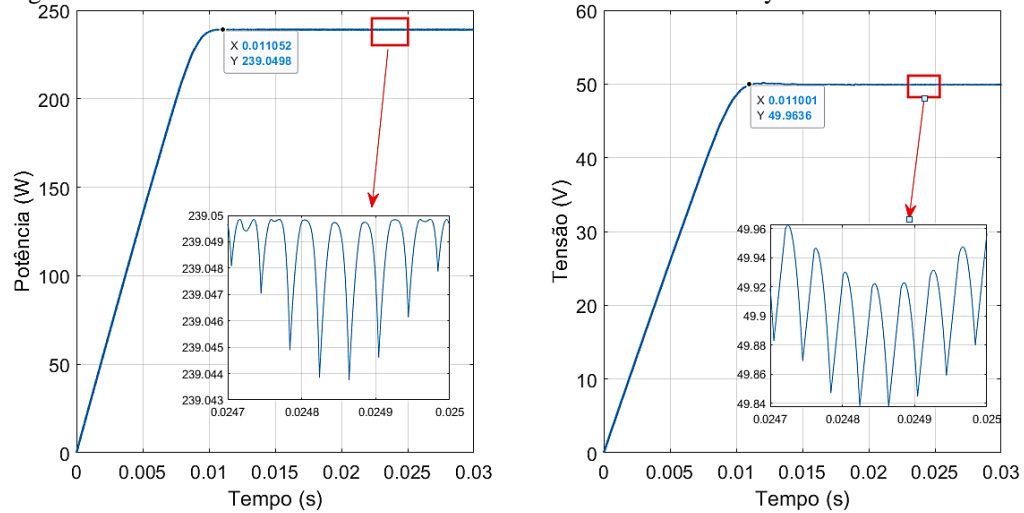


Fonte: O autor 2020.

As entradas desse controlador utilizam as medidas de corrente e tensão, assim como os dois anteriores. Os resultados quando aplicado ao sistema fotovoltaico são apresentados na Figura 87 com o gráfico de potência e tensão para irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de

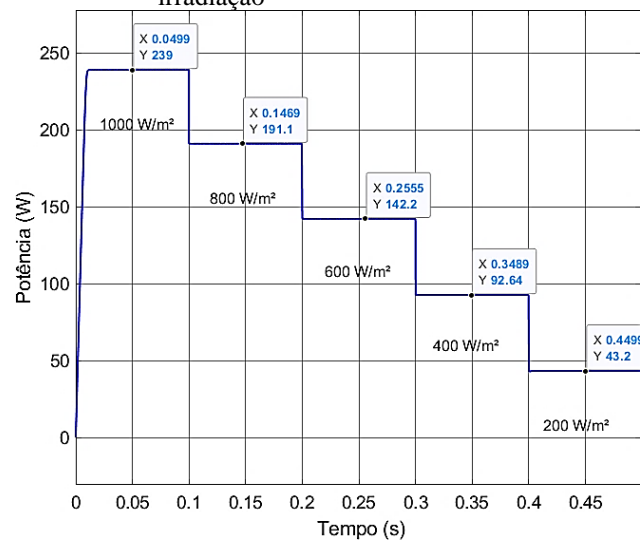
25°C. A Figura 88 mostra as curvas de potência para irradiações de 1000, 800, 600, 400 e 200 W/m<sup>2</sup>, todas na temperatura de 25°C.

Figura 87 – Potência e tensão do sistema fotovoltaico com MPPT Fuzzy



Fonte: O autor 2020.

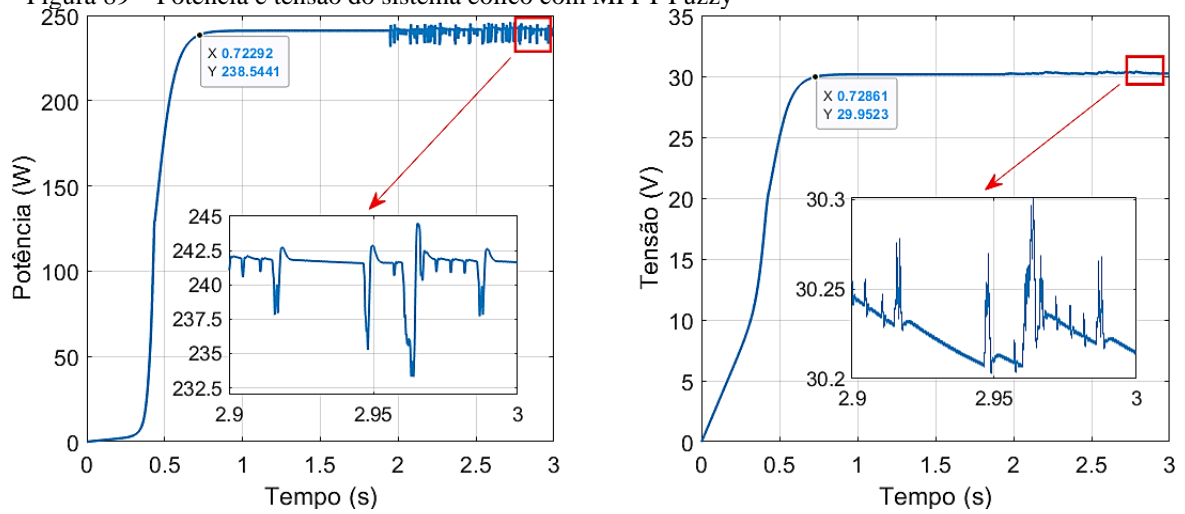
Figura 88 – Potência do sistema fotovoltaico com MPPT Fuzzy para diferentes densidades de irradiação



Fonte: O autor 2020.

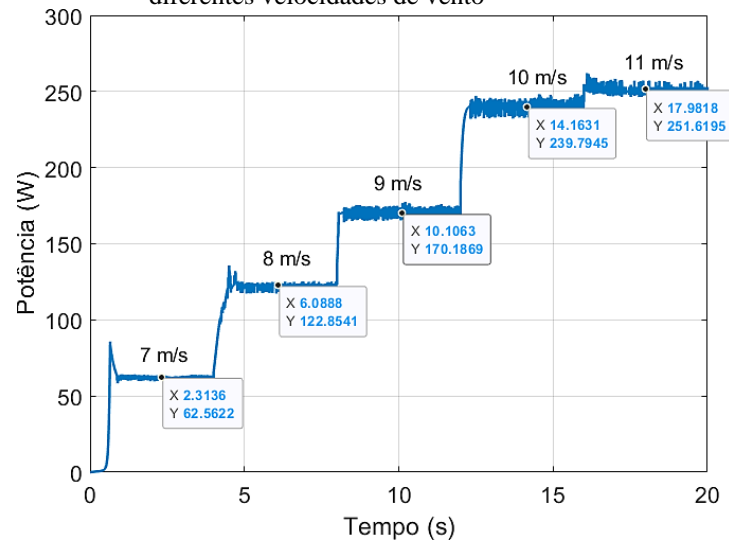
A aplicação no sistema eólico obteve os resultados apresentados na Figura 89, com as curvas de potência e tensão para vento com velocidade de 10 m/s. Em seguida, na Figura 90, são exibidas as curvas de potência para ventos de 11, 10, 9, 8 e 7 m/s.

Figura 89 – Potência e tensão do sistema eólico com MPPT Fuzzy



Fonte: O autor 2020.

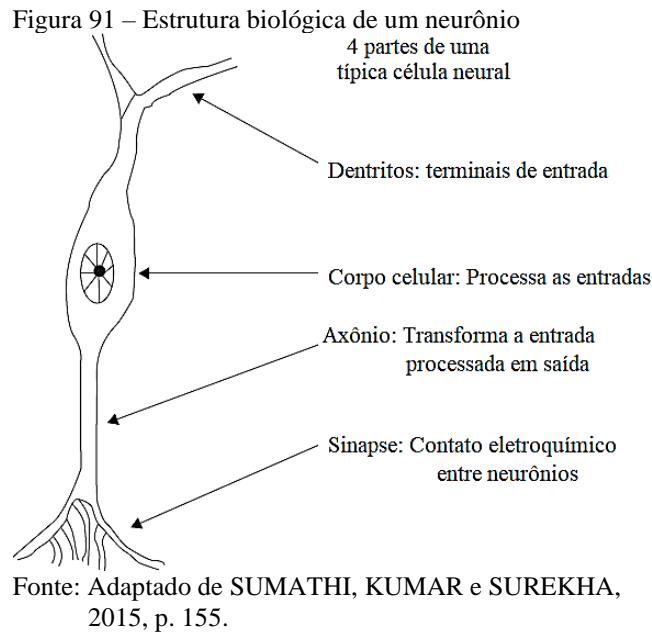
Figura 90 – Potência do sistema eólico com MPPT Fuzzy para diferentes velocidades de vento



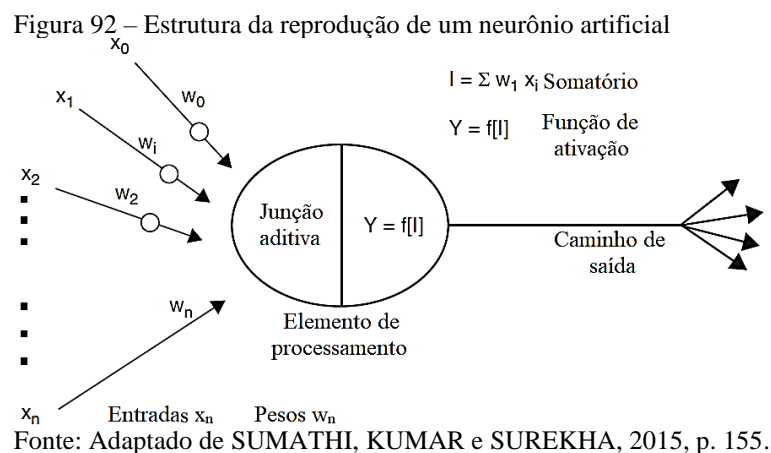
Fonte: O autor 2020.

## 5.5. Redes Neurais Artificiais (RNA)

A RNA é uma técnica inspirada no sistema nervoso central, particularmente nas células que o compõem, os neurônios. Basicamente, um neurônio biológico recebe entradas de outras fontes, as combina de alguma forma, executa uma operação geralmente não linear no resultado e, em seguida, gera o resultado final (RAM, RAJASEKAR e MIYATAKE, 2017, p. 1150). A Figura 91 mostra a estrutura de um neurônio biológico, usado como referência para os artificiais.



As redes neurais artificiais são compostas por uma grande quantidade de elementos de processamento (neurônios) interconectados para simular as funções de uma rede neural biológica. Esse modelo computacional é capaz de realizar diversas atividades complexas como reconhecimento de padrões, classificação de dados, reconhecimento de fala, processamento de imagem, identificação de sistemas entre outras aplicações com aprendizado de máquina (CHAKRAVERTY, SAHOO e MAHATO, 2019, p. 153). A representação simplificada de um neurônio artificial é exibida na Figura 92, estruturado de forma semelhante ao neurônio biológico.



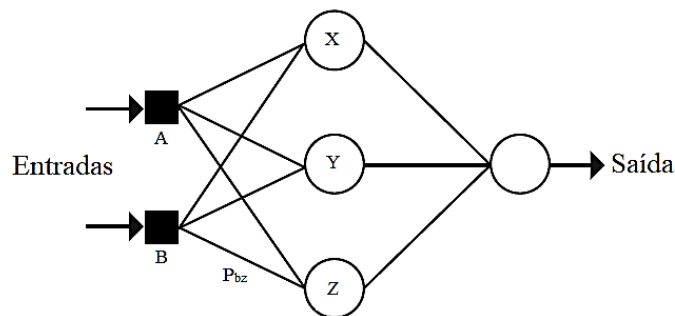
Segundo Chakraverty, Sahoo e Mahato (2019, p. 153), as redes neurais são categorizadas através dos atributos apresentados a seguir.

- Arquitetura – conexões entre neurônios;
- Treinamento ou aprendizado – determinação de pesos nas conexões;
- Funções de ativação.

A arquitetura é definida com base na organização das camadas dos neurônios e dos padrões de conexão dentro e entre camadas. Na estrutura mais simples, com uma única camada (do inglês, *single layer*), a entrada se projeta sobre uma camada de neurônios de saída. Quando a rede possui mais camadas intermediárias é chamada de multicamada (do inglês, *multilayer*). A topologia que representa as conexões entre os neurônios pode ser direta (do inglês, *feedforward*), a qual não existem ciclos de realimentação ou ligação direta da entrada com a saída, ou recorrentes (do inglês, *Feedback*) (HAYKIN, 2008, p. 48).

As camadas internas são divididas em: camada de entrada (do inglês, *input layer*), camada escondida (do inglês, *hidden layer*) e camada de saída (do inglês, *output layer*). A Figura 93 apresenta um exemplo de estrutura multicamada direta, com duas entradas, três neurônios na camada intermediária e um na saída. Cada conexão possui um peso, como por exemplo a conexão entre a entrada B e o neurônio Z possui peso  $P_{bz}$ .

Figura 93 – Estrutura de uma Rede Neural Artificial  
Camada de entrada      Camada escondida      Camada de saída



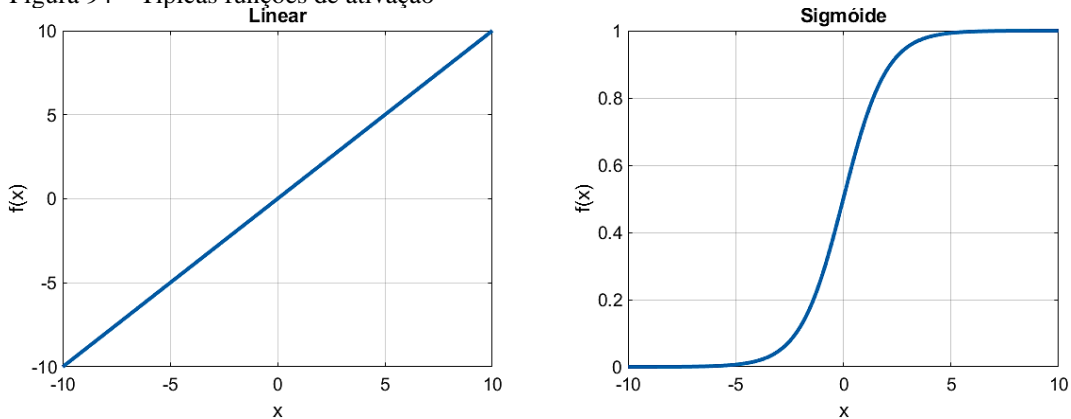
Fonte: O autor, 2020.

Os pesos são obtidos através de um processo de treinamento, que pode ser supervisionado ou não. O treinamento usado na implementação da RNA neste trabalho é o *Back Propagation*, que é um definido como supervisionado, e ajusta os pesos até que se tenha uma boa resposta aos dados de entrada e saída disponíveis (CHAKRAVERTY, SAHOO e MAHATO, 2019, p. 189).



Após realizar a soma de todas as entradas multiplicadas por seus respectivos pesos, o valor obtido é aplicado em uma função, denominada função de ativação, que define a saída do neurônio. A quantidade de funções existentes é vasta, sendo as mais comuns a linear e a sigmóide, ambas apresentadas na Figura 94. A primeira é descrita pela Equação 49 e tem como saída a entrada multiplicada por um fator constante, que no caso da ilustração gráfica pode ser unitário, tornando a saída igual a entrada. A segunda, que também é conhecida como função logística, é definida pela Equação 50 e tem o comportamento gráfico com formato da letra S, com balanceamento adequado entre o comportamento linear e não linear (HAYKIN, 2008, p. 40) (CHAKRAVERTY, SAHOO e MAHATO, 2019, p. 158).

Figura 94 – Típicas funções de ativação



Fonte: O autor, 2020.

$$f(x) = ax \quad (49)$$

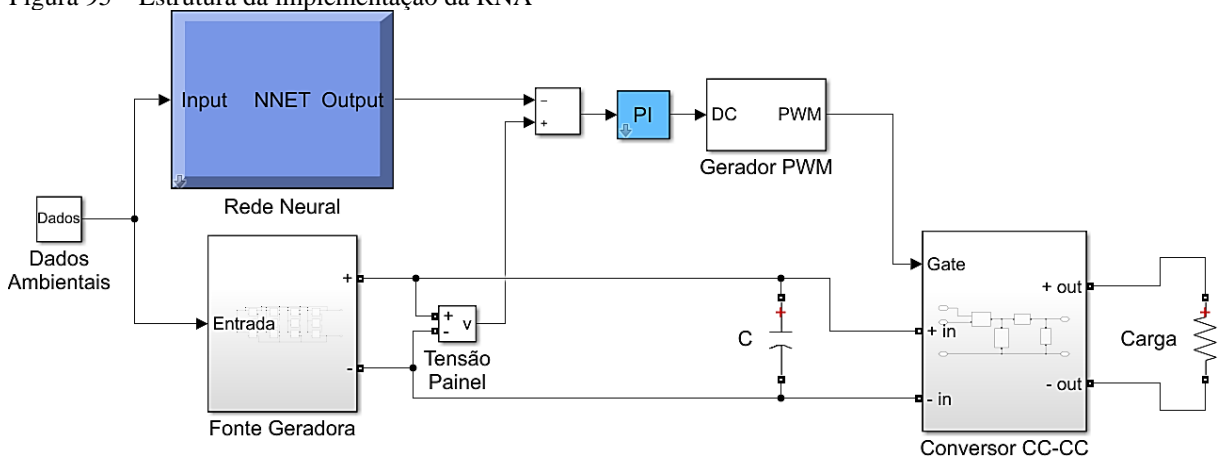
$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (50)$$

N essa técnica, as variáveis de entrada podem ser parâmetros do sistema de geração como tensão e corrente, dados atmosféricos como velocidade do vento, irradiância e temperatura ou qualquer combinação destes e outros fatores. A saída pode conter um ou vários sinais. Na aplicação realizada, a rede neural aponta a tensão que deve existir nos terminais de saída de cada sistema e esse valor é comparado com a tensão atual, gerando um sinal de erro, que por sua vez é a entrada de um controlador proporcional e integral (PI)

### 5.5.1. Implementação computacional

As implementações apresentadas a seguir contam com rede neural direta, multicamada, com treinamento *Back Propagation*, função de ativação sigmóide nos neurônios da camada escondida e linear no de saída. A RNA foi gerada usando o comando *nnstart*, a qual inicia a ferramenta do *Matlab*, que treina e exporta para o *Simulink* a rede neural elaborada. Essa ferramenta reúne algumas aplicações relacionadas a RNA existentes no programa, sendo a *nftool* a função de interesse, que é usada para ajustar curvas de acordo com dados de entrada e saída, criando uma rede neural de duas camadas. A estrutura com as interligações realizadas nos sistemas de geração é apresentada na Figura 95.

Figura 95 – Estrutura da implementação da RNA



Fonte: O autor, 2020.

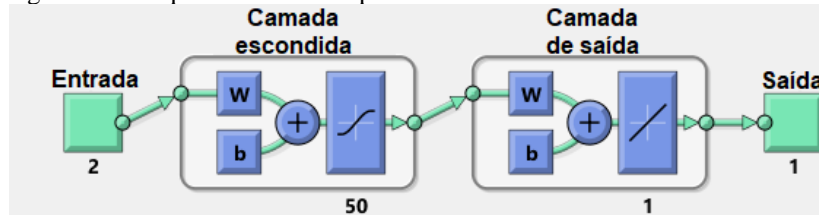
A quantidade de neurônios nas duas redes implementadas foi diferente, assim como o algoritmo de treinamento. Esses dois parâmetros foram alterados para obter resultados satisfatórios, com erro médio quadrático baixo e coeficiente de regressão que indicasse compatibilidade entre os resultados esperados e os obtidos. Além desses dos dados apresentados pela ferramenta, foram feitos testes de avaliação com uma massa de dados maior.

Para o sistema fotovoltaico foram necessários 50 neurônios e o algoritmo de treinamento usado foi alterado de *Levenberg-Marquardt (LM)* para *Bayesian Regularization (BR)*. Segundo Kayri (2016, p. 2), o algoritmo LM procura o mínimo local expresso como a soma dos quadrados de funções não lineares e a diferença entre os dois é que o método BR tem função objetiva que inclui uma soma residual de quadrados e a soma de pesos quadrados para minimizar os erros de estimativa e alcançar um bom modelo generalizado. Além disso o método BR não utilizou dados para avaliação, embora tenha sido realizada após a elaboração da rede. No sistema eólico, a rede neural é mais simples e conta com menos neurônios, foram usados

10, e nesse caso o algoritmo de treinamento padrão da ferramenta (*Levenberg-Marquardt*) foi usado.

A arquitetura gerada pelo programa para o sistema fotovoltaico é apresentada na Figura 96, com 50 neurônios na camada escondida e 1 na de saída. São utilizadas duas entradas com as informações ambientais (irradiação e temperatura) e uma saída com o valor da tensão no ponto de máxima potência.

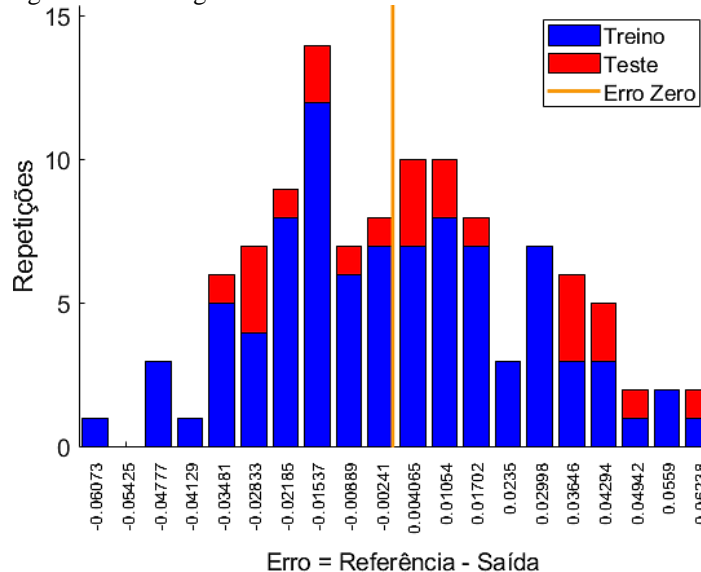
Figura 96 – Arquitetura da RNA para sistema fotovoltaico



Fonte: O autor, 2020.

Ao final foram utilizados 111 amostras de dados, com entradas associadas à saída, para o desenvolvimento, sendo 80% destinadas ao treinamento de fato e 20% para teste. Esses dados foram obtidos traçando-se a curva de potência do sistema fotovoltaico desenvolvido no item 2.7.3 com uma combinação aleatória das entradas, a qual admitiu irradiação com valores entre 110 e 11000 W/m<sup>2</sup> e temperaturas entre 5 e 40 °C. O erro apresentado ao final do desenvolvimento da RNA é exibido na Tabela 11 com o erro médio quadrático e o coeficiente de regressão e na Figura 97 com o histograma dos erros, divididos em 20 segmentos.

Figura 97 – Histograma de erros da RNA usada no sistema solar



Fonte: O autor 2020.

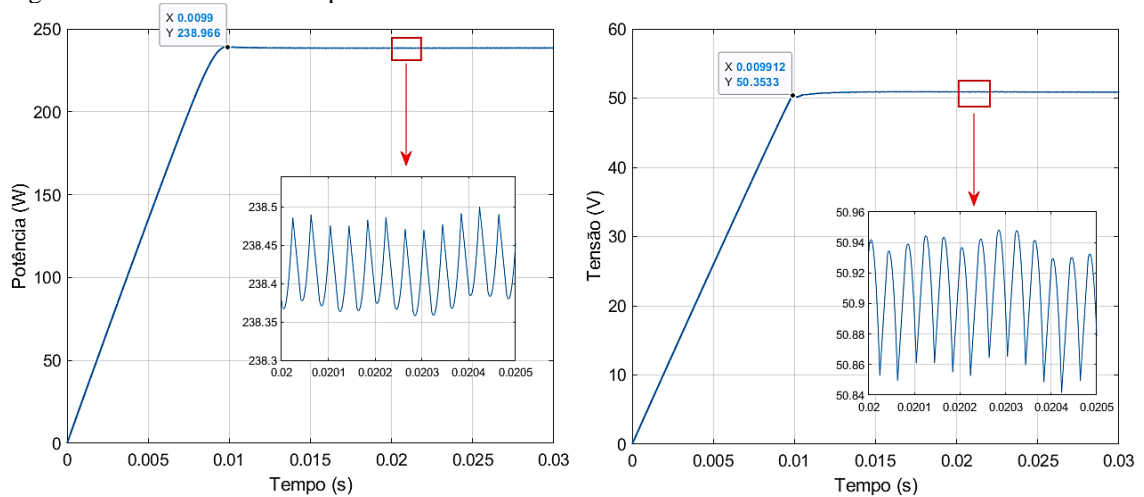
Tabela 11 – Erro apresentado para RNA do sistema fotovoltaico

	Amostras	Erro médio quadrático	Regressão
Treino	89	6,96808e-4	9,99986e-1
Teste	22	9,21715e-4	9,99966e-1

Fonte: O autor 2020.

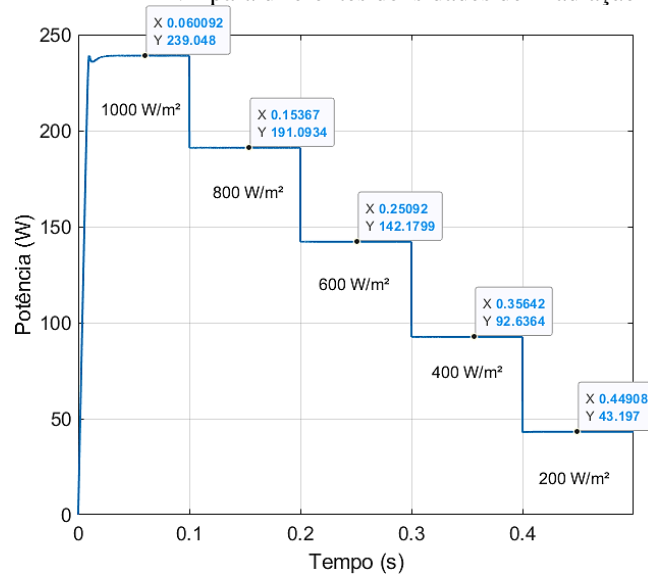
Os resultados obtidos nos testes similares às técnicas anteriores estão apresentados na Figura 98, com o gráfico de potência e tensão para irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ . A Figura 99 mostra as curvas de potência para irradiações de 1000, 800, 600, 400 e  $200 \text{ W/m}^2$ , todas na temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

Figura 98 – Potência e tensão para o sistema fotovoltaico com RNA



Fonte: O autor 2020.

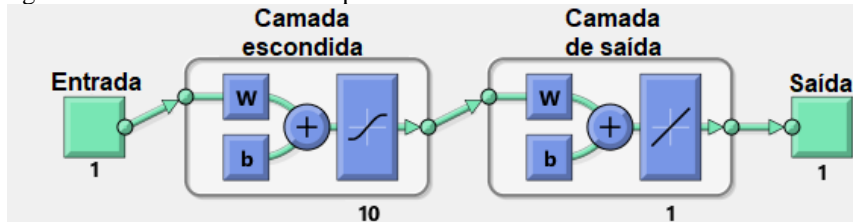
Figura 99 – Potência do sistema fotovoltaico com MPPT RNA para diferentes densidades de irradiação



Fonte: O autor 2020.

Para o sistema eólico, a rede neural possui somente uma entrada e uma saída. A estrutura gerada através da ferramenta é apresentada na Figura 100, com 10 neurônios na camada escondida e 1 na de saída. O sinal de entrada é a velocidade do vento e a saída a tensão que o gerador deve ter no ponto de máxima potência.

Figura 100 – Estrutura da RNA para sistema eólico

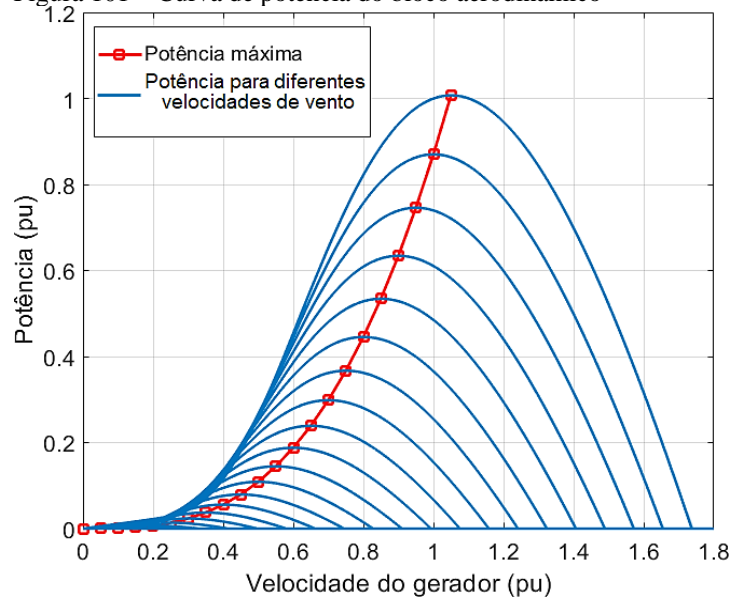


Fonte: O autor, 2020.

O levantamento das tensões no ponto de máxima potência para cada velocidade de vento foi realizado a partir das curvas de potência do bloco aerodinâmico. Após encontrar a velocidade do gerador onde o máximo ocorre, o valor é convertido para tensão de acordo com a Equação 51, que é similar a Equação 46, mas dessa vez com o fator de conversão da velocidade de pu para RPM. A Figura 101 apresenta em azul as curvas de potência para velocidades diversas velocidades, de 0 a 10 m/s, junto a curva vermelha que representa os pontos máximos para cada velocidade.

$$V_{motor} = K_m w_m w_{nominal} \quad (51)$$

Figura 101 – Curva de potência do bloco aerodinâmico



Fonte: O autor, 2020.

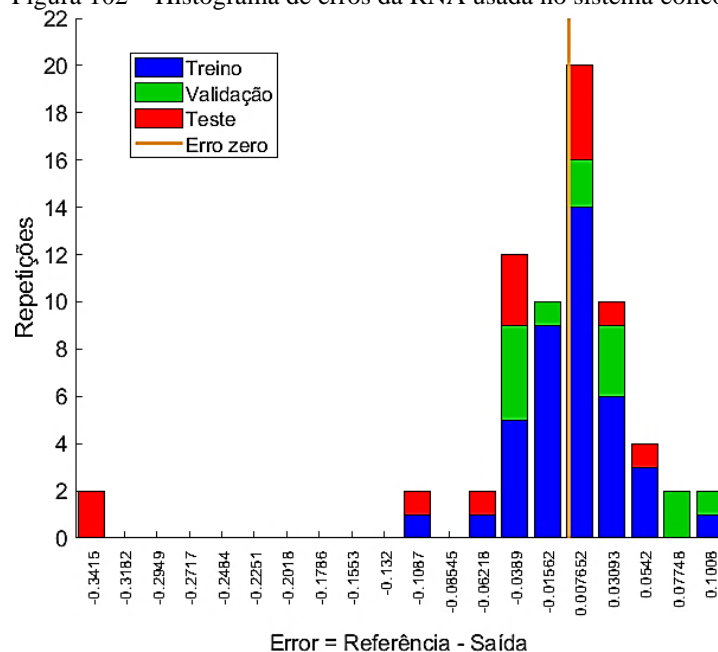
Foram utilizados 66 conjuntos de dados para o desenvolvimento da RNA, sendo 60% destinados ao treinamento, 20% para validação e 20% para teste.. Os erros apresentados pelo programa no final do desenvolvimento da RNA são exibido na Tabela 12 e na Figura 102, com o erro médio quadrático e o coeficiente de regressão com o histograma dos erros, respectivamente.

Tabela 12 – Erro apresentado para RNA do sistema eólico

	Amostras	Erro médio quadrático	Regressão
Treino	40	1,31461e-3	9,99995e-1
Validação	13	2,85724e-3	9,99991e-1
Teste	13	2,10951e-2	9,99960e-1

Fonte: O autor 2020.

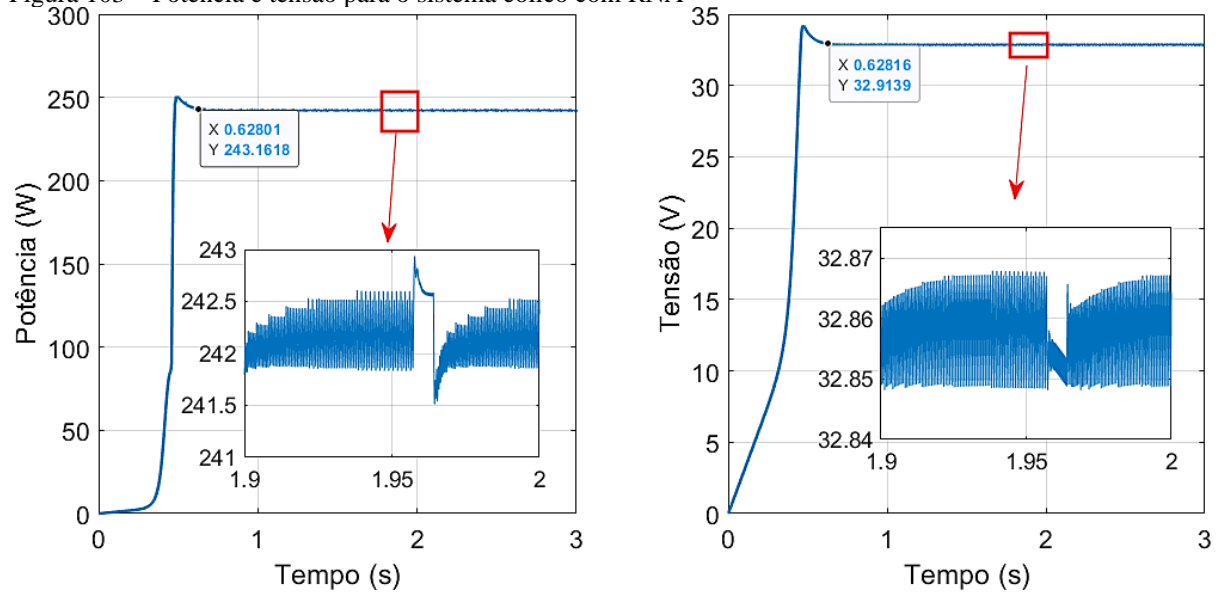
Figura 102 – Histograma de erros da RNA usada no sistema eólico



Fonte: O autor 2020.

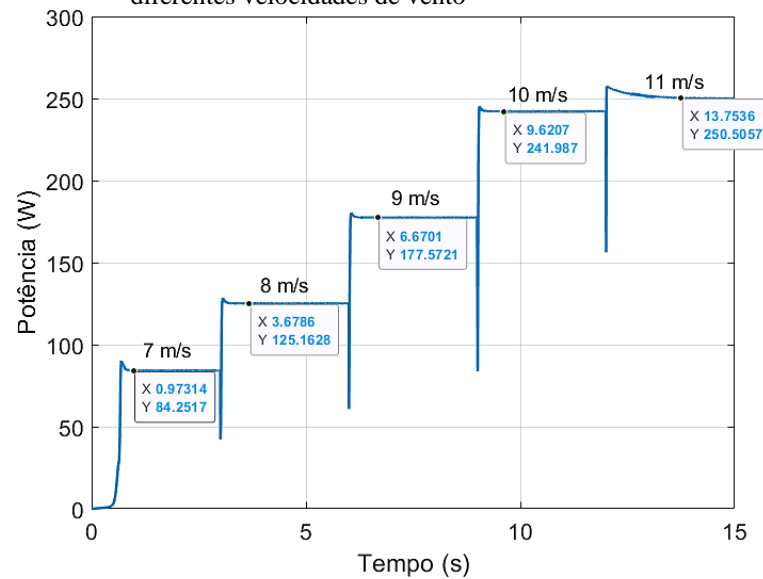
Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 103 com o gráfico de potência e tensão para vento de 10 m/s e na Figura 104 com as curvas de potência para ventos de 7, 8, 9, 10 e 11 m/s.

Figura 103 – Potência e tensão para o sistema eólico com RNA



Fonte: O autor 2020.

Figura 104 – Potência do sistema eólico com MPPT RNA para diferentes velocidades de vento



Fonte: O autor 2020.

## 5.6. Análise de resultados

Todos os casos apresentados contaram com parâmetros de entrada semelhantes, permitindo que os métodos de busca sejam facilmente comparados. Em ambas as fontes de energia foram obtidos resultados que levaram ao ponto de operação próximo à máxima potência de maneira rápida e eficaz.

Para comparar os MPPTs de cada uma das fontes foram utilizados os resultados apresentados nas simulações dos itens anteriores, avaliados através de três critérios: potência gerada, tempo para chegar ao ponto de operação e flutuação. Autores como Ram, Rajasekar e Miyatake (2017, p. 1155), Sachan, Gupta e Samuel, (2016, p. 396) e Sumathi, Kumar e Surekha (2015, p. 129) utilizam critérios como esses e outros relacionados a complexidade da implementação, quantidade de sensores etc. Os critérios apresentados para comparação nesse trabalho foram escolhidos para avaliar a performance de cada um deles, com o objetivo de escolher o com melhor desempenho.

A comparação da potência máxima teórica com a gerada é fundamental, pois dessa maneira é possível verificar se o MPPT encontrou o ponto de operação correto e para realizar tal comparação foram utilizadas cinco condições ambientais diferentes para cada MPPT. Na avaliação de intervalo que cada algoritmo levou para alcançar o ponto de operação, foram comparados os tempos que cada um levou partindo de uma condição de repouso (sem irradiação solar ou vento) para condição ambiental de 1.000,00 W/m<sup>2</sup> e 25 °C no sistema fotovoltaico e para vento de 10 m/s para o sistema eólico. Por último, foi observada a variação de potência no ponto de operação encontrado.

No caso do sistema fotovoltaico, as potências geradas com o auxílio dos MPPTs foram iguais ao valor esperado em todos os casos, como pode ser visto na Tabela 13. Nos quatro casos os sistemas foram “rápidos”, com respostas na faixa de milissegundos, e com flutuações baixas, conforme Tabela 14. A implementação com redes neurais se mostrou a mais veloz de todas e a lógica Fuzzy a que se mostrou mais estável, com menor flutuação em regime permanente.

Tabela 13 – Potências obtidas no sistema fotovoltaico

<b>Irradiação</b>	<b>Potência máxima esperada</b>	<b>Potência obtida com os MPPTs</b>
1000 W/m <sup>2</sup>	239 W	239 W
800 W/m <sup>2</sup>	191,1 W	191,1 W
600 W/m <sup>2</sup>	142,2 W	142,2 W
400 W/m <sup>2</sup>	92,6 W	92,6 W
200 W/m <sup>2</sup>	43,2 W	43,2 W

Fonte: O autor 2020.



Tabela 14 – Características dos MPPTs no sistema fotovoltaico

<b>Método</b>	<b>Tempo para chegar ao ponto de operação</b>	<b>Flutuação</b>
P&O	16,58 ms	0,188 %
Cond. Inc.	44,90 ms	0,017 %
Fuzzy	11,00 ms	0,003 %
RNA	9,91 ms	0,042 %

Fonte: O autor 2020.

Ao contrário do sistema com painéis solares, as quatro técnicas apresentaram resultados diferentes quando aplicadas ao sistema eólico proposto (Tabela 15). O algoritmo P&O encontrou pontos de operação que não correspondiam aos pontos máximos para 4 dentre as 5 condições de teste, chegando a produzir menos da metade da potência esperada. Os métodos Condutância Incremental e logica Fuzzy encontraram boas regiões de operação para os ventos a partir de 8 m/s, entretanto, para vento com velocidade de 7 m/s ambos ficaram distantes do valor esperado. A técnica implementada através de Redes Neurais Artificiais obteve percentuais muito parecidos para todas as velocidades de vento testadas e reproduziu potências muito próximas ao esperado.

Em todos os sistemas aplicados ao aerogerador o intervalo para chegar ao ponto de operação foram mais lentos quando comparados ao sistema fotovoltaico, evidenciando que a dinâmica do sistema eólico proposto é mais lenta (Tabela 16). Mesmo assim, os valores obtidos foram próximos à 1 segundo e, quando comparados as variações de velocidade nos ventos, são aceitáveis e podem ser até considerados “rápidos”. O MPPT que alcançou seu ponto de operação com intervalo de tempo mais curto foi o RNA, que também manteve uma boa flutuação em regime permanente.

Tabela 15 – Potências obtidas no sistema eólico

<b>Velocidade do vento</b>	<b>Potência máxima esperada</b>	<b>P&amp;O</b>	<b>Cond. Ind.</b>	<b>Fuzzy</b>	<b>RNA</b>
11 m/s	250 W	100,29 %	100,50 %	100,65 %	100,22 %
10 m/s	249,93 W	81,96 %	96,24 %	95,94 %	96,82 %
9 m/s	182,25 W	59,43 %	93,52 %	93,38 %	97,43 %
8 m/s	127,93 W	44,82 %	96,12 %	96,03 %	97,83 %
7 m/s	85,70 W	48,10 %	81,87 %	73,00 %	98,31 %

Fonte: O autor 2020.

Tabela 16 – Características dos MPPTs no sistema eólico

<b>Método</b>	<b>Tempo para chegar ao ponto de operação</b>	<b>Flutuação</b>
P&O	1,05 s	1,80 %
Cond. Inc.	0,89 s	0,60 %
Fuzzy	0,73 s	4,00 %
RNA	0,62 s	0,60 %

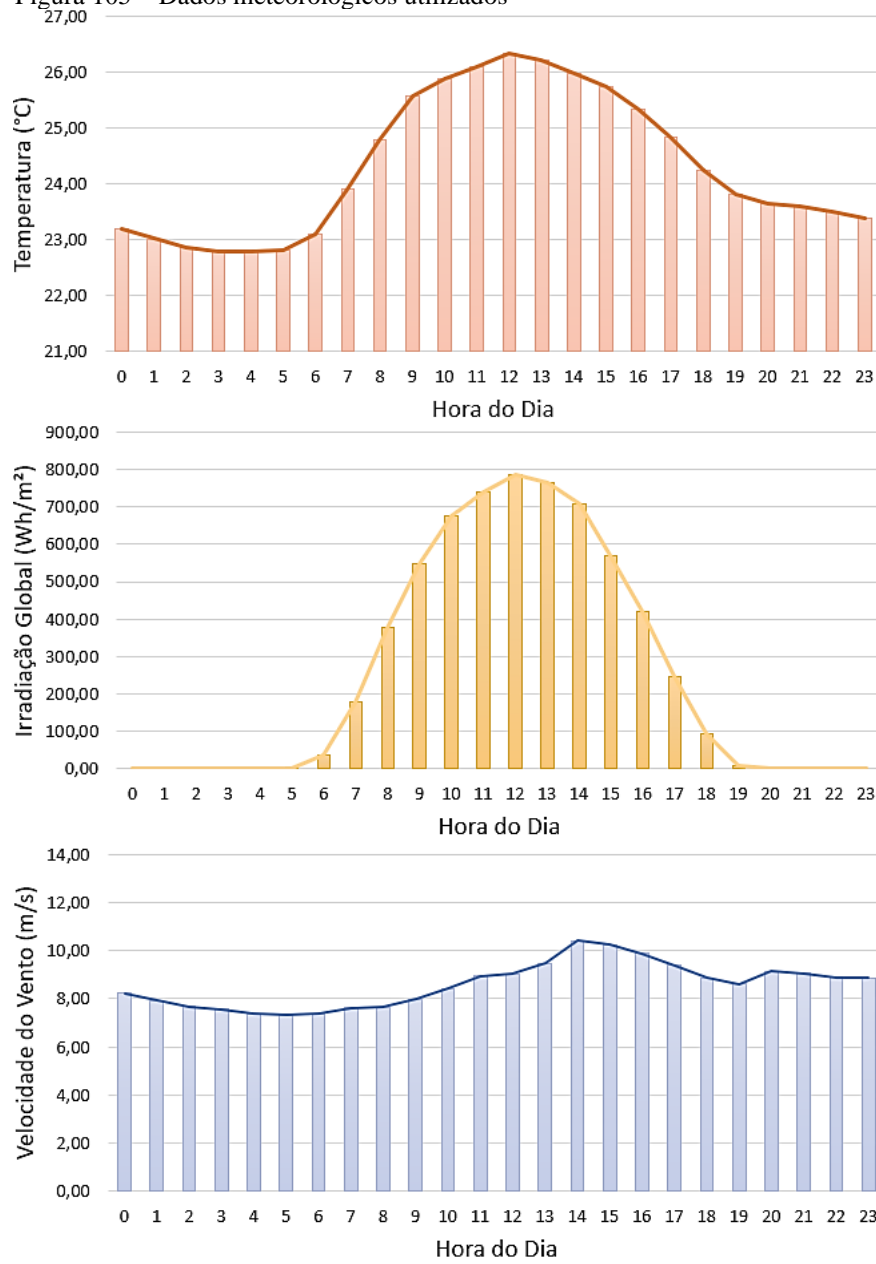
Fonte: O autor 2020.

Utilizando os parâmetros discutidos, o MPPT que apresentou o melhor resultado para o sistema fotovoltaico foi o que utilizou lógica Fuzzy, pois sua estabilidade após encontrar o ponto de operação foi muito maior que os demais e é apenas 1,1 ms mais lento que a técnica mais veloz. No sistema eólico o rastreador que teve os melhores resultados foi o que utilizou Redes Neurais Artificiais, com potências geradas próximas do esperado em todas as condições de teste, baixa flutuação e sendo o mais rápido dos quatro.

Além da avaliação realizada entre os métodos, os MPPTs que apresentaram melhores resultados foram realizadas simulações com os respectivos sistemas de geração sem técnicas de busca, a fim avaliar o ganho percentual com a utilização das técnicas empregadas. Os dados meteorológicos utilizados foram coletados através da estação automática de Arraial do Cabo, no estado do Rio de Janeiro, disponibilizados pelo INMET em sua plataforma virtual (INMET, 2020). A partir dos dados do mês de dezembro de 2019, os valores de irradiação global foram convertidos para Wh/m<sup>2</sup>, conforme apresentado por Lima, Hack e Avença (2015, p. 54), e a velocidade do vento foi transformada para uma altura de 20 m, com coeficiente de fricção para cidade de acordo com a Equação 22 e Tabela 3. Em seguida foram calculadas as médias dos dados de irradiação global, temperatura e velocidade do vento para cada hora do dia desse mês, resultando nos gráficos da Figura 105.

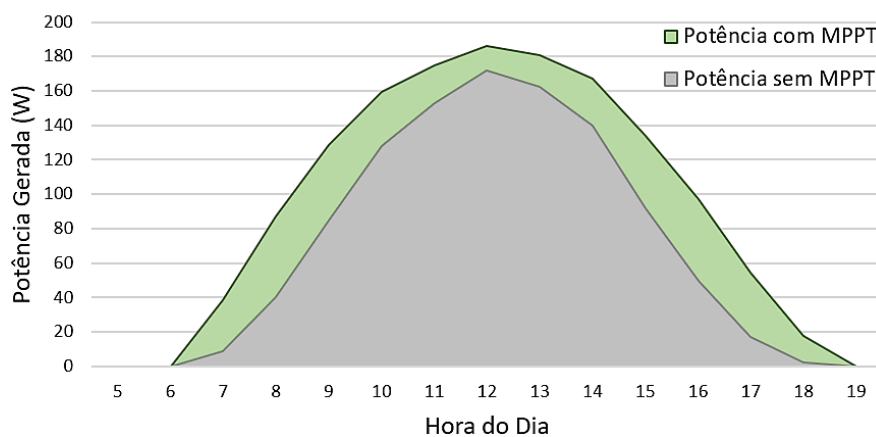
O resultado para o sistema com painéis solares mostrou aumento de 35,80 % com a utilização do MPPT Fuzzy, passando de 1050,30 W para 1426,35 W diários. No caso do sistema eólico, o ganho foi de 25,28 %, saindo de 3022,56 W para 3786,58 W produzidos ao longo do dia. Os gráficos que demonstram a produção ao longo do dia são exibidos na Figura 106 para o sistema solar e na Figura 107 para o sistema eólico, nos quais o ganho de potência é representado pela curva verde. Esses dados corroboram com a ideia apresentada no início deste capítulo, indicando que tais métodos melhoram o aproveitamento da geração energética, e demonstram que houve aumento significativo na potência produzida por ambos os sistemas.

Figura 105 – Dados meteorológicos utilizados



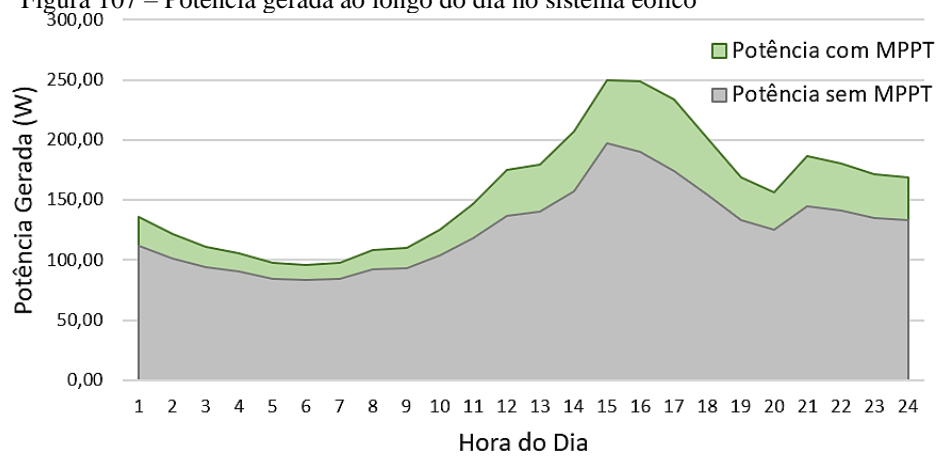
Fonte: O autor 2020.

Figura 106 – Potência gerada ao longo do dia no sistema fotovoltaico



Fonte: O autor 2020.

Figura 107 – Potência gerada ao longo do dia no sistema eólico

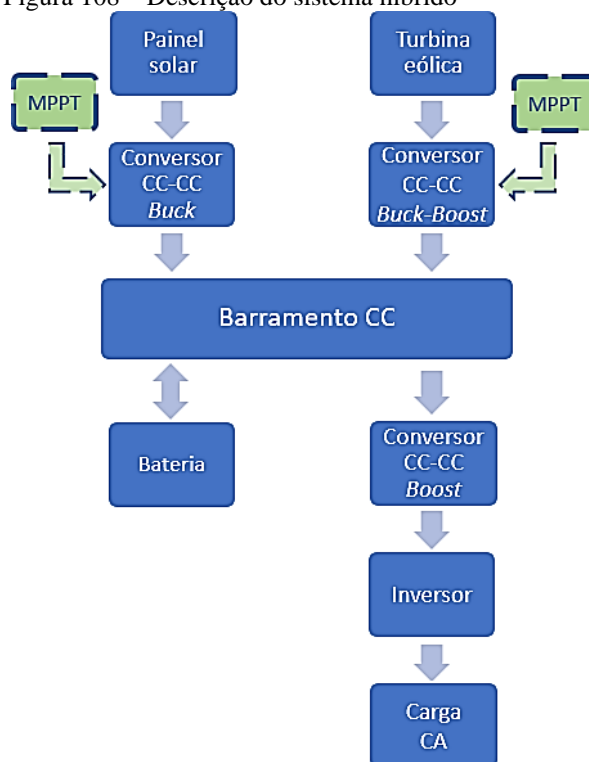


Fonte: O autor 2020.

## 6. SISTEMA HÍBRIDO

O sistema de microgeração híbrido é composto pelos sistemas fotovoltaico e aerogerador apresentados anteriormente, em conjunto com os mecanismos de busca para máxima potência, e tem sua estrutura conforme Figura 108. O ponto de máxima potência no sistema com painéis solares é obtido com a utilização do algoritmo baseado em lógica Fuzzy, enquanto para o sistema eólico utiliza-se Redes Neurais Artificiais. Ambos levam o sistema ao ponto ideal de operação através da alteração da razão cíclica dos conversores CC-CC. A carga é alimentada pelo inversor que transforma a tensão do barramento CC amplificada pelo conversor *Boost* em alternada.

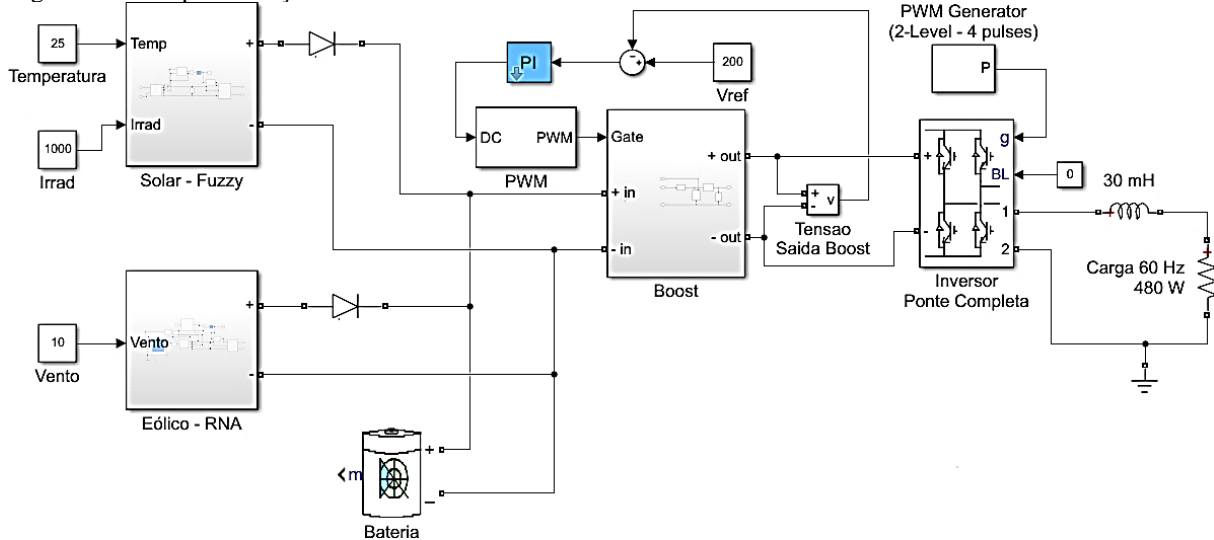
Figura 108 – Descrição do sistema híbrido



Fonte: O autor 2020.

A estrutura do sistema elaborado tem como base o circuito apresentado em Sumathi, Kumar e Surekha (2015, p. 461), que é uma forma comum de implementar sistemas isolados desse tipo e pode ser visto também em outros trabalhos tais como Arun Shastry, Suresh e Vinayaka (2015, p. 856), Dali, Belhadj e Roboam (2010, p. 2588), Gupta, Kumar e Bansal (2015, p. 1368). As conexões realizadas entre os componentes no ambiente de simulação são apresentadas na Figura 109.

Figura 109 – Implementação do sistema híbrido

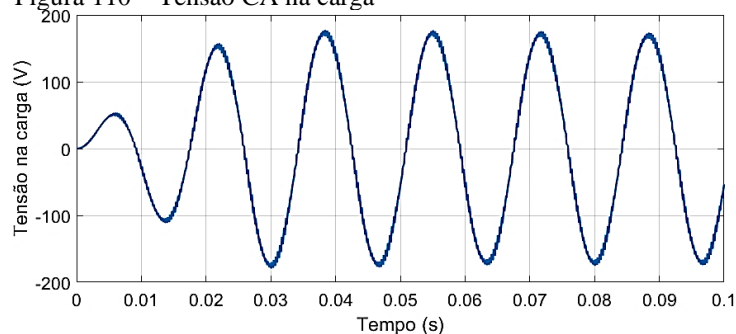


Fonte: O autor 2020.

Os blocos “Solar – Fuzzy” e “Eólico – RNA” contêm o modelo das fontes de energia em conjunto com os respectivos sistemas de busca que apresentaram os melhores resultados no Capítulo 5 e estão conectados ao barramento CC. Nesse ponto em comum também está presente uma bateria que além de armazenar energia, auxilia na estabilização da tensão no barramento (LAGORSE, SIMÕES e MIRAUI, 2009, p. 2124).

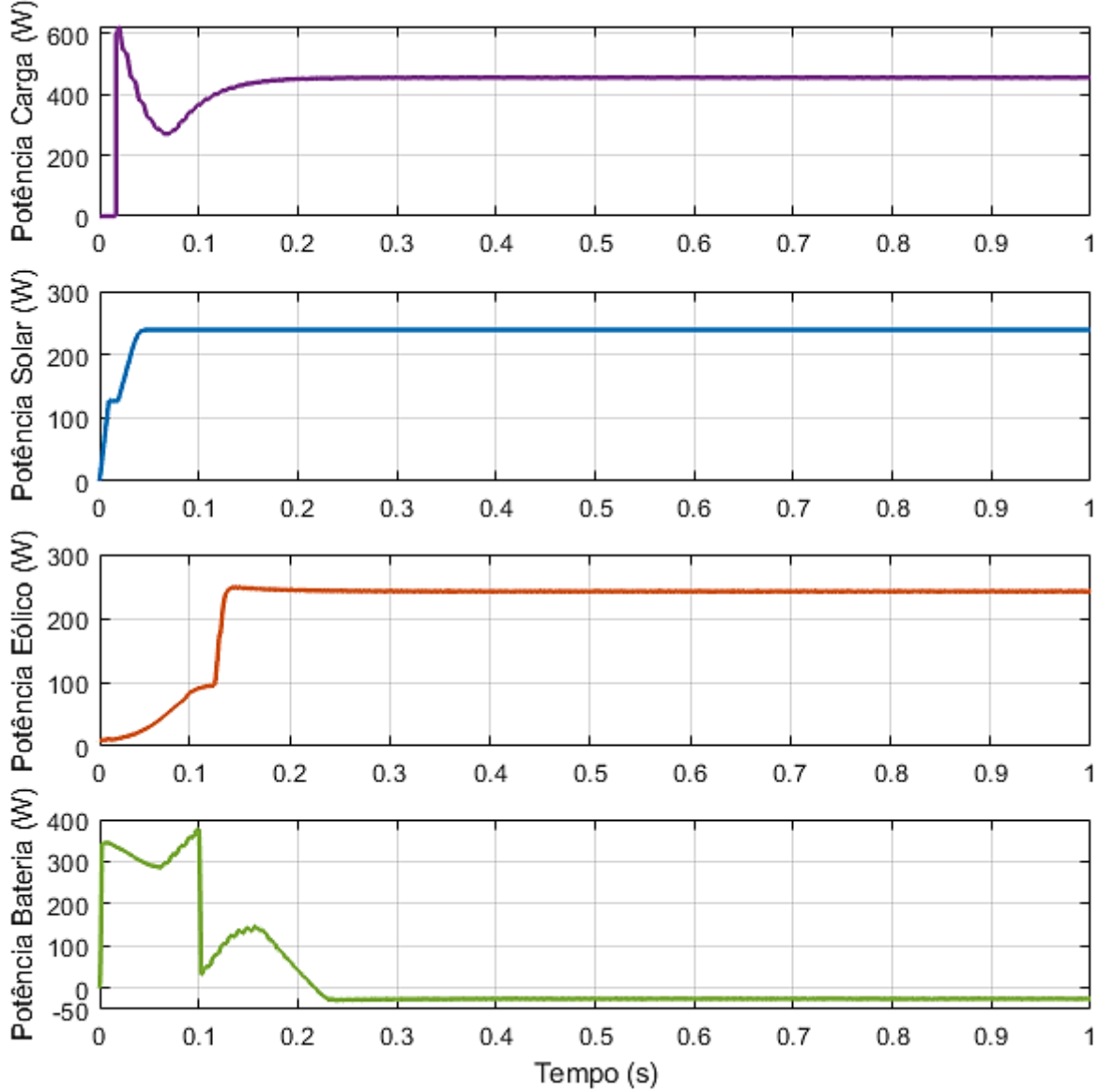
Para teste inicial com uma carga de 480 W, 60 Hz e tensão eficaz de 127 V, a forma de onda da tensão na carga obtida é a apresentada na Figura 110. A Figura 111 exibe as curvas de potências geradas por cada elemento e a consumida pela carga, a qual é alimentada pelo elemento armazenador no período inicial e conforme a geração dos sistemas aumenta, a participação da bateria deixa de ser necessária e sua utilização é reduzida até que todo o consumo passa a ser suprido pelas fontes e o excedente armazenado, representado no gráfico como uma potência negativa. O percentual de carga da bateria para essa condição de teste é apresentado na Figura 112

Figura 110 – Tensão CA na carga



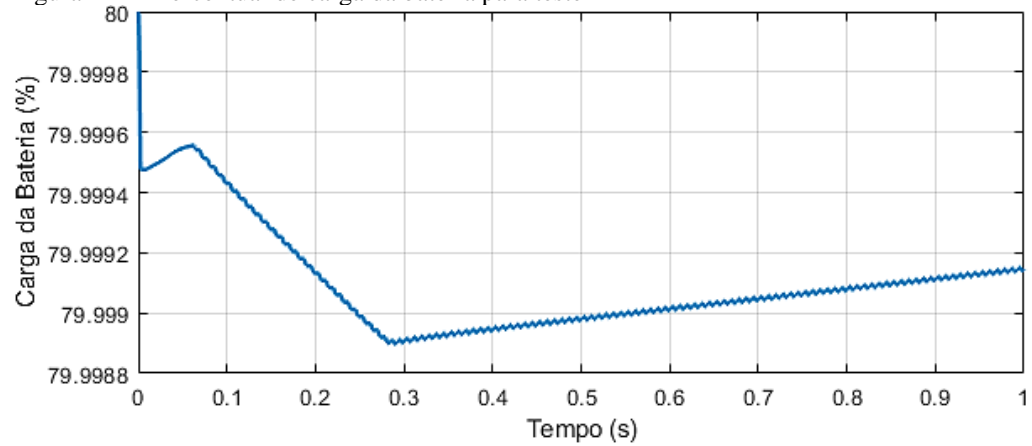
Fonte: O autor 2020.

Figura 111 – Curvas de potência para carga de 480 W



Fonte: O autor 2020.

Figura 112 – Percentual de carga da bateria para teste

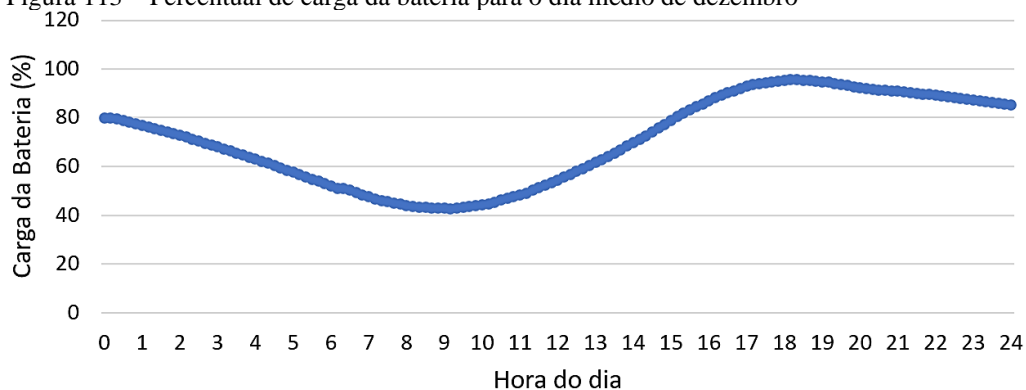


Fonte: O autor 2020.

Essa situação representa o comportamento do sistema em condições de operação quando os elementos geradores alimentam a carga e quando um deles realiza a função em conjunto com o banco de baterias, mas conta com um intervalo muito curto. Para verificar o funcionamento do sistema híbrido em condições próximas às de operação real foram utilizados os dados apresentados no item 5.6, Figura 105, com o dia médio de dezembro de 2019 para alimentar uma carga fixa de 200 W. A Figura 113 exibe o percentual de carga na bateria ao longo do dia. As curvas de potência consumida, geradas pelas fontes de energia e da participação da bateria são apresentadas na Figura 114, na qual é possível notar que no meio do dia a bateria passa a ser carregada com o excedente produzido, representado pela cor verde no gráfico de potência da bateria.

Durante todo o período analisado a carga foi suprida e seu consumo foi constante, entretanto, ao longo do dia diferentes situações ocorrem. Através do gráfico de potência da bateria é possível notar que no período inicial a carga é suprida pela energia armazenada em conjunto com a produção eólica. Com o avanço do dia o sol nasce e a densidade de irradiação aumenta fazendo que os painéis solares forneçam energia, reduzindo a necessidade do uso da bateria até que, por volta das 8 horas os geradores em conjunto passam a produzir mais do que a carga consome e o excedente passa a ser armazenado para utilização futura, descrito pela cor verde no gráfico de potência da bateria. Ao anoitecer a produção do sistema fotovoltaico cai, voltando para uma situação similar ao início do dia.

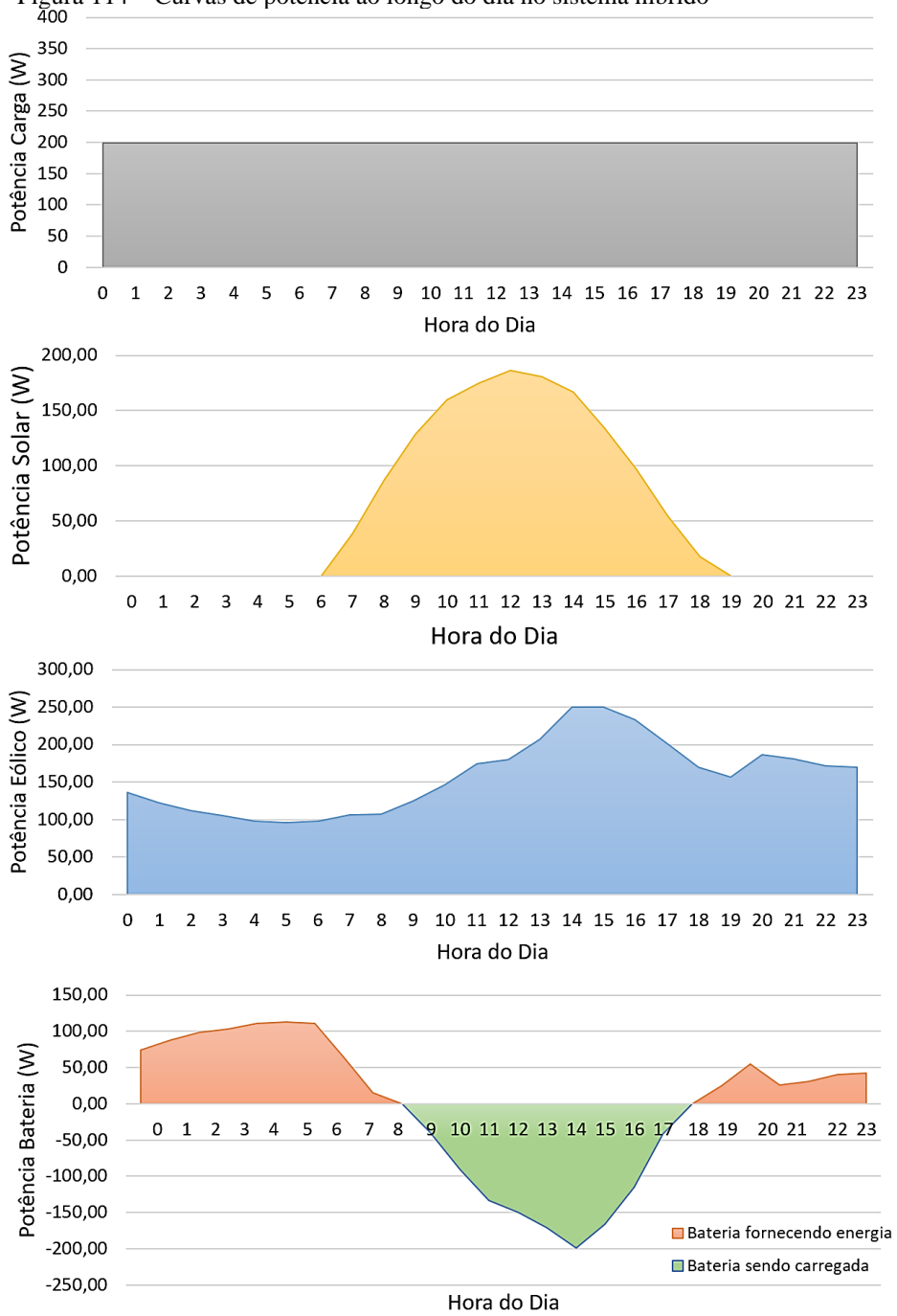
Figura 113 – Percentual de carga da bateria para o dia médio de dezembro



Fonte: O autor 2020.



Figura 114 – Curvas de potência ao longo do dia no sistema híbrido



Fonte: O autor 2020.

## CONCLUSÃO

A alta demanda por fontes de energia renováveis e a redução no crescimento de fontes poluentes mostram que o mercado está em um momento de transição e o futuro da produção energética está fortemente ligada a fontes que menos agridem o meio ambiente. Nesse meio crescem as pequenas e micro produções realizadas pelo próprio consumidor, que por muitas vezes utiliza mais de uma fonte de energia, podendo estar ligadas ou não ao *grid*.

Ao longo deste trabalho foram apresentadas duas fontes de energia renováveis, agrupadas ao final formando um sistema de microgeração híbrido solar-eólico. A partir dos fundamentos dessas fontes e da utilização de parâmetros disponíveis nas folhas de dados do painel solar e do motor de corrente contínua desenvolveu-se modelagem para uma turbina eólica e um sistema fotovoltaico de 12 painéis solares.

A elaboração de sistemas de simulação é uma ótima solução para desenvolver projetos personalizados e mais eficientes, de acordo com a necessidade do consumidor, além de permitir observar o comportamento do sistema em uma eventual alteração ou ampliação na instalação. No presente trabalho, foram testados quatro métodos de maximização diferentes, em cada uma das fontes, de maneira previa à elaboração do modelo híbrido solar-eólico. Os resultados mostraram que, de maneira geral, as técnicas mais inteligentes ligadas à *soft computing*, são mais eficientes que as outras duas convencionais.

Para o sistema com painéis solares o MPPT que conseguiu alcançar a melhor produção foi o de lógica Fuzzy, que apresentou a menor flutuação no ponto de operação. Parte desse resultado está ligado à resposta rápida do sistema e à variação na amplitude dos ajustes, que é reduzida ao encontrar o ponto ótimo. No caso eólico, a resposta do sistema era lenta e quando o algoritmo Fuzzy encontrava o ponto de operação, o sistema apresentava uma resposta diferente, relativa aos ajustes anteriores, aumentando a amplitude do ajuste e causando uma flutuação maior. A técnica que teve melhores resultados para esse sistema foi a que utilizava RNA, gerando para cada velocidade de vento a tensão de referência ideal que o aerogerador deveria alcançar.

Os dados obtidos nas comparações da geração com e sem o uso de MPPT apresentaram ganhos expressivos na produção energética de cada fonte, sendo 36,80 % para o sistema fotovoltaico e 25,28 % no sistema eólico. Esses resultados mostram que uso de MPPTs nesse tipo de geração não é somente uma recomendação para melhorar o desempenho do sistema, mas sim um item necessário para se obter a real produção desses dispositivos e reduzir os gastos de instalação, diminuindo a quantidade de painéis ou turbinas instaladas.

Ao juntar as duas formas de geração foi elaborado um sistema híbrido que contou com uma bateria para armazenar o excedente produzido e utilizá-lo quando necessário. Como tratava-se de um sistema isolado, a adoção do elemento armazenador de energia foi de grande importância para manter o funcionamento pleno da carga durante todo o tempo. Mesmo que os painéis solares não forneçam energia o dia todo, quando entram ativamente no sistema, a adição de sua produção extrapolou a necessidade do consumo definido, carregando a bateria com energia suficiente para terminar o dia com a mesmo percentual de carga inicial.

Com isso foi possível alcançar os objetivos definidos no início do trabalho e apresentar resultados compatíveis com os sistemas reais os quais foram baseados, gerando uma solução para maximizar a produção de energia das fontes renováveis aplicadas ao sistema híbrido proposto, suprimindo de maneira eficiente a carga em condições isoladas

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, W. G.; DAY, R. E. The Action of Light on Selenium. **Proceedings of the Royal Society**, v. A25, p. 113–117, 1876.
- ALVAREZ, A. L. M.; SAIDEL, M. A. **Uso racional e eficiente de energia elétrica: metodologia para determinação dos potenciais de conservação dos usos finais em instalações de ensino e similares**. São Paulo: USP, 1998.
- AMARANTE, O. A. C. D. et al. **ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO**. Brasília: [s.n.], 2001.
- ARUN SHASTRY, P. S.; SURESH, K. V.; VINAYAKA, K. U. Hybrid wind-solar systems using CUK-SEPIC fused converter with quasi-Z-source inverter. **2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC)**, Bhubaneswar, p. 856-861, 2015. ISSN DOI: 10.1109/PCITC.2015.7438115.
- BECQUEREL, E. Memoire sur les effets electriques produits sous l'influence des rayons solaires. **Comptes Rendus**, v. 9, p. 561–564, 1839.
- BEYER, H. G.; LANGER, C. A method for the identification of configurations of PV/wind hybrid systems for the reliable supply of small loads. **Solar energy**, v. 57, n. 5, p. 381-391, 30 julho 1996. ISSN ISSN: 0038-092X.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education, 2013.
- CHAKRAVERTY, S.; SAHOO, D. M.; MAHATO, N. R. **Concepts of Soft Computing Fuzzy and ANN with Programming**. Singapura: Springer, 2019.
- DALI, M.; BELHADJ, J.; ROBOAM, X. Hybrid solar–wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode: Control and energy management – Experimental investigation. **Elsevier, Energy**, v. 35, n. 6, p. 2587-2595, Junho 2010. ISSN ISSN 0360-5442.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima**. 1. ed. [S.l.]: Marinha do Brasil, 2018.
- EINSTEIN, A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. **Annalen der Physik**, v. 17, n. Versão traduzida por Dirk ter Haar, "On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light", p. 132-148, 1905.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional - Ano base 2019**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2020.
- FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. 7<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: McGRAW-HILL, 2014.
- FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS. **Photovoltaics report**. ISE. Freiburg. 2019.
- GLOBAL SOLAR ATLAS. GSA Report. **Global Solar Atlas**, 2019. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/download/brazil>>. Acesso em: 28 Janeiro 2020.
- GLOBAL WIND ATLAS. GSA Report. **Global Wind Atlas**, 2019. Disponível em: <<https://globalwindatlas.info/en/area/Brazil?print=true>>. Acesso em: 28 jan. 2020.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Statistics 2016**. GWEC. Bruxelas. 2017.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2019**. GWEC. Bruxelas. 2020.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **REVISTA USP**, n. 72, p. 6-15, 2006.

GUPTA, R. A.; KUMAR, R.; BANSAL, A. K. BBO - based small autonomous hybrid power system optimization incorporating wind speed and solar radiation forecasting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1366-1375, 6 Novembro 2015. ISSN ISSN: 1364-0321.

HABBATI BELLIA, R. Y. M. F. A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. **NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics**, v. 3, p. 53-61, 16 Maio 2014. ISSN ISSN: 2090-9977.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; JEARL. **Fundamentos de física: óptica e física moderna**. 10<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: LTC, v. 4, 2016.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: Princípios e Prática**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Bookman, 2008.

HEIER, S. **Grid integration of wind energy: onshore and offshore conversion systems**. 3<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2014.

INMET. DADOS HISTÓRICOS ANUAIS. **Instituto Nacional de Meteorologia**, 2020. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 13 Agosto 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Glossários. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**, 2018. Disponível em: <<https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>>. Acesso em: 15 maio 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2016**. International Energy Agency. [S.l.]. 2017. (ISBN: 978-3-906042-58-9).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2018**. International Energy Agency. [S.l.]. 2018. (ISBN: 978-3-906042-72-5).

KAYRI, M. Predictive Abilities of Bayesian Regularization and Levenberg–Marquardt Algorithms in Artificial Neural Networks: A Comparative Empirical Study on Social Data. **Mathematical and Computational Applications**, v. 21, p. 1-11, Maio 2016.

KAZIMIERCZUK, M. K. **Pulse-width modulated DC–DC power converters**. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.

LAGORSE, J.; SIMÕES, M. G.; MIRAQUI, A. A Multiagent Fuzzy-Logic-Based Energy Management of Hybrid Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 45, n. 6, p. 2123-2129, Nov./Dez. 2009. ISSN ISSN: 1939-9367.

LIMA, B. G. D.; HACK, R. R.; AVENÇA, R. B. **Comparação dos Níveis de Irradiação Apresentados por Diferentes Fontes de Dados no Estado do Paraná e Determinação do Potencial de Geração de Energia Elétrica por Fonte Fotovoltaica em Curitiba**. Trabalho de Conclusão de Curso. ed. Curitiba: UTFPR, 2015.

LUO, F. L.; YE, H. **Power Electronics: Advanced Conversion Technologies**. Boca Raton: CRC Press, 2018.

MASSON, G.; BRUNISHOLZ, M. **Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2015**. International Energy Agency. [S.l.]. 2016. (ISBN: 978-3-906042-42-8).

MASSON, G.; BRUNISHOLZ, M. **Snapshot of Global PV Market 2019**. International Energy Agency. [S.l.]. 2020. (ISBN: 978-3-906042-83-1).

MASTERS, G. **Renewable and efficient electric power systems**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

MAXON MOTOR GROUP. **Maxon DC motor**. Maxon. Sachseln. 2020. (RE 65).

MAXON MOTOR GROUP. Maxon DC motor 353296. Disponível em: <<https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/353296>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

MCVEIGH, J. C. **Sun Power: An Introduction to the Applications of Solar Energy**. 2ª. ed. [S.l.]: Pergamon Press, Oxford, 1983.

OHLENFORST, K. et al. **Global Wind Report 2018**. Global Wind Energy Council. Bruxelas. 2019.

OTTEN, G. V.; BELLAFFIORE, D. Energy and Circulation. **College of Earth and Mineral Sciences**, 2018. Disponível em: <<https://www.e-education.psu.edu/emsc100tsb/node/329>>. Acesso em: 14 mar. 2020.

PARASCHIVOIU, I. **Wind Turbine Design With Emphasis on Darrieus Concept**. Canadá: Presses internationales Polytechnique, 2002.

PAVLOVIC, T. et al. **The Sun and Photovoltaic Technologies**. [S.l.]: Springer Nature, 2019.

PEDERSEN, J. L. **Science, Engineering and People with a Mission: Danish Wind Energy in Context 1891-2010**. Schumpeter Conference 2010. Aalborg: The International Schumpeter Society Conference. 2010.

PEREIRA, N. D. T. **Sistema Híbrido De Produção De Energia Elétrica Para Autoconsumo**. Porto: Universidade do Porto, 2015.

PINTO, L.; SZCZUPAK, J.; TORRES, G. Portfólios híbridos – Quando um mais um somam mais que dois. **Editora Brasil Energia**, 2018. Disponível em: <<https://cenarioseolica.editorabrasilenergia.com.br/2018/12/04/portfolios-hibridos-quando-um-mais-um-somam-mais-que-dois/>>. Acesso em: 25 Junho 2020.

RAM, J. P.; RAJASEKAR, N.; MIYATAKE, M. Design and overview of maximum power point tracking techniques in wind and solar photovoltaic systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1138-1159, Fevereiro 2017. ISSN ISSN: 1364-0321.

RASHID, M. H. **Power Electronics Handbook**. Cambridge: Elsevier, 2018.

REDDY, D.; RAMASAMY, S. A fuzzy logic MPPT controller based three phase grid-tied solar PV system with improved CPI voltage. **Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)**, p. 1-6, 2017. ISSN doi: 10.1109/IPACT.2017.8244953.

REN21. **Renewables 2020 Global Status Report**. Paris. 2020. (ISBN 978-3-948393-00-7).

RODRIGUES, P. R. **Energias Renováveis Energia Eólica**. [S.l.]: JELARE, 2011.

RPS SOLAR SOLUTIONS. PPT - PV System Design and Installation, 2018. Disponível em: <<https://www.slideserve.com/maleah/pv-system-design-and-installation>>. Acesso em: 01 out. 2019.

SACHAN, A.; GUPTA, A. K.; SAMUEL, P. A Review of MPPT Algorithms Employed in Wind Energy Conversion Systems. **Journal of Green Engineering**, v. 6, n. 4, p. 385-402, Outubro 2016.

SHAH, K. et al. Maximum Power Point Tracking Methods for Wind and Solar conversion Systems for Standalone Generation PSIM based Perturb and Observe Method. **International Journal of Engineering Research and Development (IJERD)**, p. 46-54, Abril 2015. ISSN ISSN: 2278-067X.

SØRENSEN, B. **Renewable Energy: Physics, Engineering, Environmental, Impacts, Economics and Planning**. Cambridge: Elsevier, 2017.

SOUZA, F. S.; GARRASINO, R. C. F.; SILVA, C. M. M. Energia e Sustentabilidade: Análise do Padrão de Consumo Familiar dos Estudantes Universitários. **Revista Faculdade Santo Agostinho**, Teresina, v. 16, n. 1, p. 146-164, Jan./Fev. 2019. ISSN ISSN: 1806-6356.

- SUMATHI, S.; KUMAR, L.; SUREKHA, P. **Solar PV and Wind Energy Conversion Systems**. [S.l.]: Springer, 2015.
- THE MATHWORKS, INC. **Fuzzy Logic Toolbox User's Guide**. Massachusetts: [s.n.], 2020.
- THE MATHWORKS, INC. Math Works Help Center. **Implement model of variable pitch wind turbine**, 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/windturbine.html>>. Acesso em: 12 maio 2020.
- THE MATHWORKS, INC. **Simulink User's guide**. Massachusetts: [s.n.], 2020.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2. ed. Recife: [s.n.], 2006.
- VERMA, D. et al. Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photo voltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1018-1034, 2016. ISSN ISSN: 1364-0321.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. **IEEE Transactions On Power Electronics**, v. 24, n. 5, p. 1198-1208, 2009. ISSN ISSN: 0885-8993.
- YARAMASU, V.; WU, B. **Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems**. Piscataway: John Wiley & Sons, 2017.

## Anexo A – Determinação de $R_s$ e $R_p$

```

%*****
%Script adaptado de:
%Green Energy and Technology
%Solar PV and Wind Energy Conversion Systems
%nas páginas 76 a 78
%por: S. Sumathi, L. Ashok Kumar e P. Surekha
%*****

clear all;
clc;

%Constantes

q=1.6021766208*10^-19; %Carga do elétron [C]. Fonte: NIST
k=1.38064852*10^-23; %Constante de Boltzmann [J/K]. Fonte: NIST
a=1.3; %Fator de idealidade do diodo
Tk=273.15; %Fator de conversão entre Celsius e Kelvin

%Parâmetros do painel

Iscn= 1.31; %Corrente de curto nominal [A]
Vocn= 21.4; %Tensão nominal com circuito aberto [v]

Imp= 1.2; %Corrente nominal no ponto maximo de potencia do painel
[A]
Vmp= 16.6; %Tensão nominal no ponto máximo de potência do painel
[V]
Pmax_e= Vmp*Imp; %Pico máximo de potência no painel [W]

Kv= -0.37; %Coeficiente tensão/temperatura [V/K]
Ki= 0.06; %Coeficiente corrente/temperatura [A/K]

Ns= 36; %Número de células em série

%Ajustes do algoritmo

T=25+Tk; %Temperatura de teste
Vt= k*T/q; %Tensão de junção na temperatura de teste

Io= Iscn/(exp(Vocn/a/Ns/Vt)-1); %Corrente nominal de saturação do diodo

%Valores de referência para  $R_s$  e  $R_p$ 
Rs_max= (Vocn-Vmp)/Imp;
Rp_min= Vmp/(Iscn-Imp)-Rs_max;

%Valor inicial de  $R_p$  e  $R_s$ 
Rp= Rp_min;
Rs= 0;

tol=0.001; %Tolerância erro potência

P=(0);

```



```

error=tol+1;          %Valor alto para realizar a primeira iteração

%Processo iterativo para Rs e Rp até Pmax,modelo=Pmax,experimental

while (error>tol)

    %incremento de Rs
    Rs=Rs+0.001;

    %Calculo da corrente fotogerada para resistências atuais
    Ipvn= (Rs+Rp)/Rp *Iscn;

    %Resistencia paralelo
    Rp= Vmp*(Vmp+Imp*Rs) / (Vmp*Ipvn-Vmp*Io*exp((Vmp+Imp*Rs)/Vt/Ns/a)+Vmp*Io-
                                                                    Pmax_e);

    %Resolvendo a equação I-V para alguns pontos
    clear V
    clear I

    V= 0:0.001:Vocn;          %Vetor de tensão
    I= zeros(1,size(V,2));    %Vetor de corrente

    for j=1 :size(V,2)        %calcula para os valores de tensão

        %resolve g=I-f(I,V)=0 por Newton Raphson
        g(j)=Ipvn-Io*(exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a)-1)-(V(j)+I(j)*Rs)/Rp-
                                                                    I(j);
        while(abs(g(j))>0.001)
            g(j)=Ipvn-Io*(exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a)-1)-(V(j)+I(j)*Rs)/Rp-
                                                                    I(j);
            glin(j)=-Io*Rs/Vt/Ns/a*exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Ns/a)-Rs/Rp-1;
            I_(j)=I(j)-g(j)/glin(j);
            I(j)=I_(j);
        end;
    end
    %calculo de potência usando eq. I-V
    P=(Ipvn-Io*(exp((V+I.*Rs)/Vt/Ns/a)-1)-(V+I.*Rs)/Rp).*V;
    Pmax_m = max(P);
    error=(Pmax_m-Pmax_e);

end

%saídas
fprintf('\nRp=%f',Rp);
fprintf('\nRs=%f',Rs);
fprintf('\nPmax,m=%f(modelo)',Pmax_m);
fprintf('\nPmax,e=%f(experimental)',Pmax_e);
fprintf('\nP_error=%f',error);

```

## Anexo B – Folha de dados do painel solar

# JS 20 SERIES

YL020P-17b 1/7



### ABOUT GAIN SOLAR

Founded in 2007, Baoding Jiasheng Photovoltaic Technology Co., Ltd which markets its products under the brand "Gain Solar", is a wholly owned subsidiary of Yingli Solar, specializing in R&D, manufacturing and marketing of photovoltaic (PV) off-grid products and systems. What started as the in-house off-grid PV module production of Yingli Solar has developed over the years into a full-blown provider of off-grid PV modules, building-integrated PV modules, off-grid PV systems and solar application products. Founded on the Yingli Solar technology development, production, and distribution platform, Gain Solar has rapidly grown to set up branches in major provinces and cities of China and is now expanding its presence to the global level. Gain solar is dedicated to provide high quality off-grid PV products and systems to customers and received a series of certificate, including ISO9001, TUV, UL, CE, CQC and RoHS.

### PERFORMANCE

High efficiency, polycrystalline solar cells with high transmission and textured glass delivering a module efficiency of up to 15.0%, minimizing installation costs and maximizing the kWh output of your system per unit area.

### QUALITY AND RELIABILITY

- Industry leading in-house manufacturing of polysilicon, ingots, wafers, cells and modules ensures tight control of our material and production quality.
- Robust, corrosion resistant aluminum frame independently tested to withstand wind loads of 2.4 kPa and snow loads of 2.4 kPa ensuring a stable mechanical life for your modules.
- Module packaging optimized to protect product during transportation and minimize on-site waste.
- This type of module is commonly use for the small off-grid system.

[GAINSOLAR.CN](http://GAINSOLAR.CN)

# JS 20 SERIES

## ELECTRICAL PERFORMANCE

### Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module name	JS 20		
Module type	YL20P-17b 1/7		
Power output	$P_{max}$	W	20
Power output tolerances	$\Delta P_{max}$	%	+/- 5
Module efficiency	$\eta_m$	%	11.50
Voltage at $P_{max}$	$V_{mp}$	V	16.60
Current at $P_{max}$	$I_{mp}$	A	1.20
Open-circuit voltage	$V_{oc}$	V	21.4
Short-circuit current	$I_{sc}$	A	1.31

STC: 1000W/m<sup>2</sup> irradiance, 25°C cell temperature, AM1.5g spectrum according to EN 60904-3.  
Average relative efficiency reduction of 5% at 200W/m<sup>2</sup> according to EN 60904-1.

## THERMAL CHARACTERISTICS

Nominal operating cell temperature	NOCT	°C	46 +/- 2
Temperature coefficient of $P_{max}$	$\gamma$	%/°C	-0.45
Temperature coefficient of $V_{oc}$	$\beta_{oc}$	%/°C	-0.37
Temperature coefficient of $I_{sc}$	$\alpha_{sc}$	%/°C	0.06

## OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	50V <sub>oc</sub>
Max. series fuse rating	5A
Limiting reverse current	Don't apply external voltages larger than Voc of the module
Operating temperature range	-40 to 85°C
Max. static load, front (e.g., snow and wind)	2400Pa
Max. static load, back (e.g., wind)	2400Pa
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

## CONSTRUCTION MATERIALS

Front cover (material / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Cell (quantity / material / dimensions)	36 / monocrystalline silicon / 70mm x 52mm
Encapsulant (material)	ethylene vinyl acetate (EVA)
Frame (material / color / anodization color)	anodized aluminum alloy / silver / clear

Due to continuous innovation, research and product improvement, the specifications in this product information sheet are subject to change without prior notice. The specifications may deviate slightly and are not guaranteed.  
The data do not refer to a single module and they are not part of the offer, they only serve for comparison to different module types.

Baoding Jiasheng Photovoltaic Technology Co., Ltd  
Add: No. 333 North Lekai Avenue 071051, Baoding, China  
Email: jsgd@yinglisolar.com  
Web: www.gainsolar.cn  
Service hotline: +86 312 863 1510/892 2683  
Fax: +86 312 892 2202

**GAINSOLAR.CN**

© Baoding Jiasheng Photovoltaic Technology Co., Ltd | JS020P-17b\_17\_EU\_EN\_201403\_v02

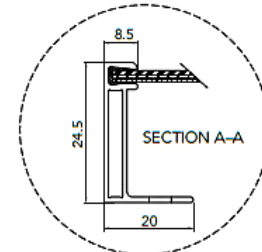
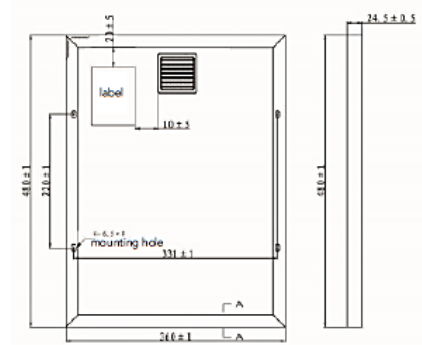
## GENERAL CHARACTERISTICS

Dimensions (L / W / H)	360mm / 480mm / 25mm
Weight	2.26kg

## PACKAGING SPECIFICATIONS

Number of modules per box	6
Packaging box dimensions (L / W / H)	390mm / 510mm / 190mm

Unit: mm



Warning: Read the Installation and User manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli Solar modules. operating Yingli Solar modules.

Our Partners:



Power Your Life

## Anexo C – Parâmetros de inicialização

```

clear all;
clc;

%*****
%Parâmetros do painel solar YL020P-17b 1/7
%da Yingli Solar de 20 W.
%*****

%Constantes
q=1.6021766208*10^-19; %Carga do elétron [C]. Fonte: NIST
k=1.38064852*10^-23; %Constante de Boltzmann [J/K]. Fonte: NIST
a=1.3; %Fator de idealidade do diodo Si-poly (Mesmo do
livro)
Tk=273.15; %Fator de conversão entre Celsius e Kelvin

%Parâmetros do painel (Retirados do Datasheet)

Ns= 36; %Número de células em série

Iscn= 1.31; %Corrente de curto nominal [A]
Vocn= 21.4; %Tensão nominal com circuito aberto [V]

Imp= 1.2; %Corrente nominal no ponto máximo de potência do painel [A]
Vmp= 16.6; %Tensão nominal no ponto máximo de potência do painel [V]

Kv= -0.37; %Coeficiente tensão/temperatura [V/K]
Ki= 0.06; %Coeficiente corrente/temperatura [A/K]

%Condições nominais do datasheet
Tn=Tk+25;
Gn=1000;

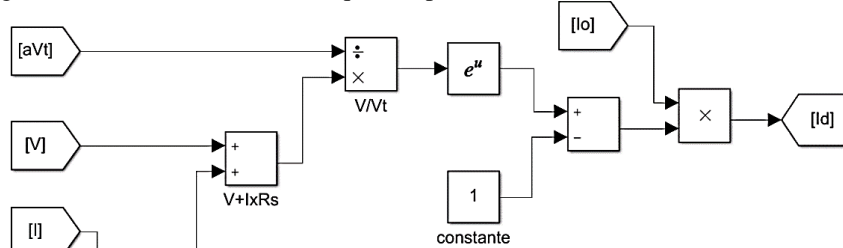
%Valores de calculados para Rs e Rp
Rs=1.328; %Resistência série
Rp=866.734589; %Resistência paralelo

```

**Anexo D – Representação em blocos das equações da célula solar**

Equação 5:

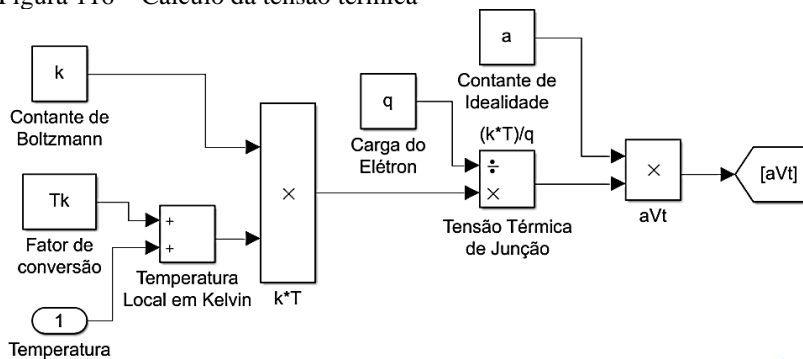
Figura 115 – Cálculo da corrente que flui pelo diodo



Fonte: O autor 2020.

Equação 6 com adição da constante de idealidade do material:

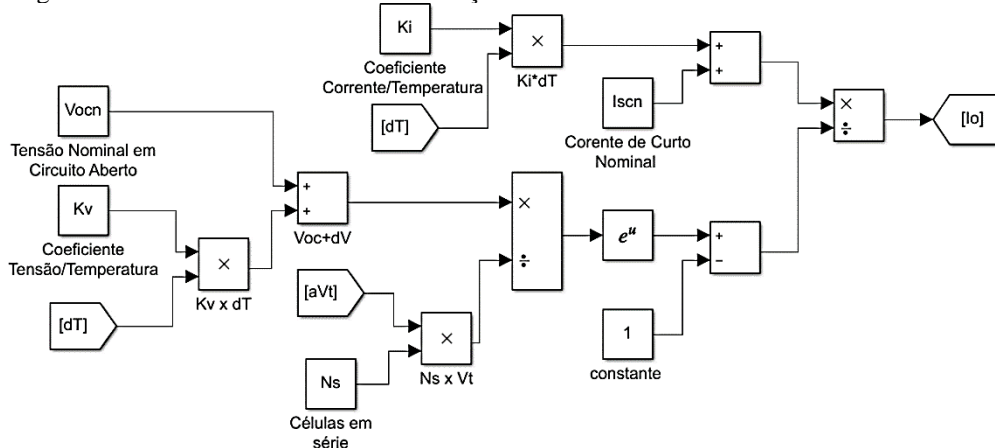
Figura 116 – Cálculo da tensão térmica



Fonte: O autor 2020.

Equação 8:

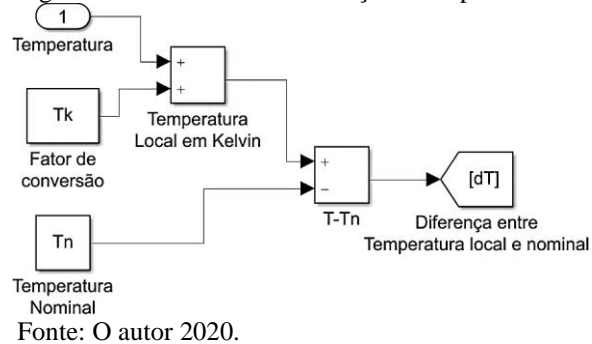
Figura 117 – Cálculo da corrente de saturação reversa no *Simulink*



Fonte: O autor 2020.

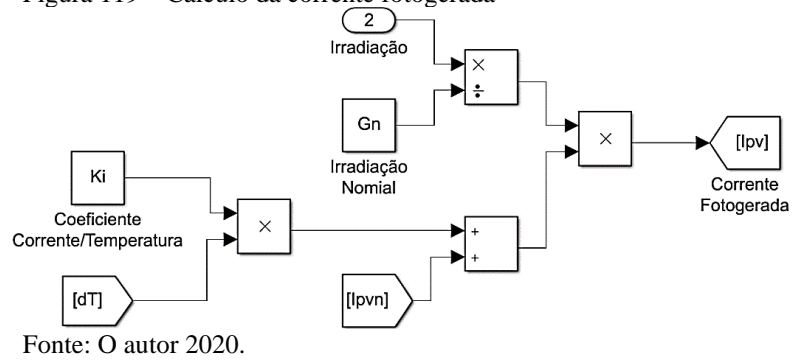
Equação 9:

Figura 118 – Cálculo da diferença de temperatura



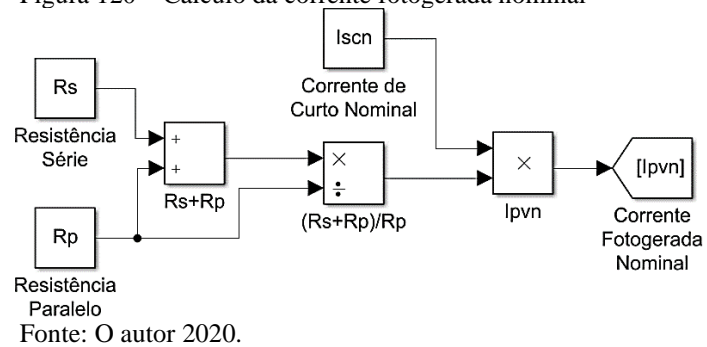
Equação 12:

Figura 119 – Cálculo da corrente fotogerada



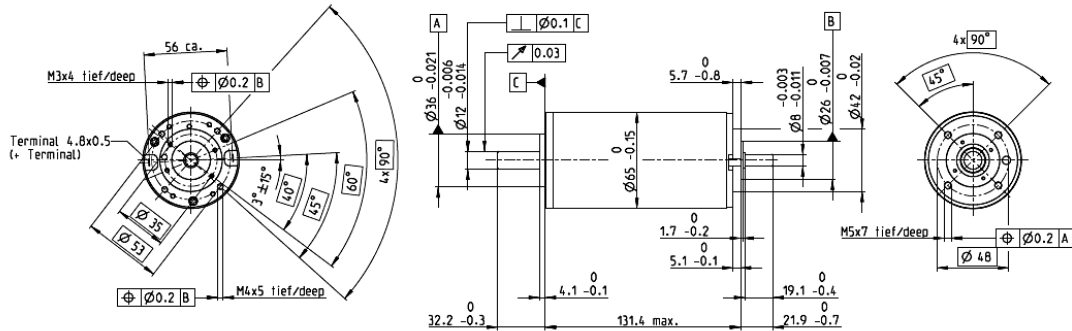
Equação 13:

Figura 120 – Cálculo da corrente fotogerada nominal



Anexo E – Folha de dados do motor CC Maxon 353296

RE 65 Ø65 mm, Graphite Brushes, 250 Watt



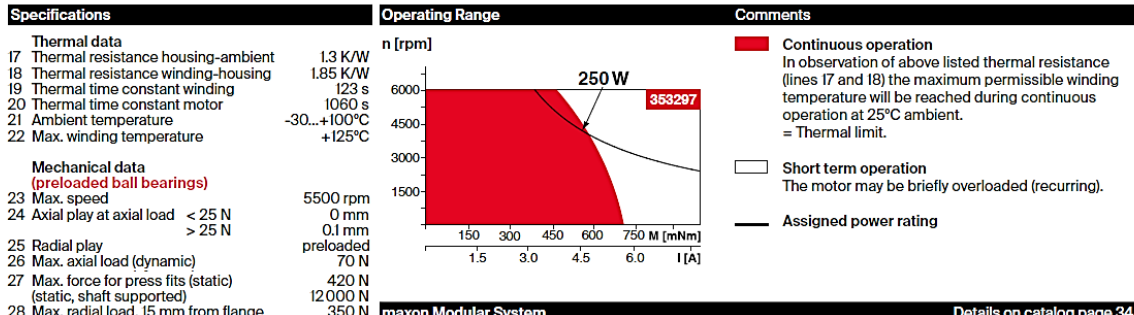
RE

M 1:4

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers							
353294	353295	353296	353297	353298	353299	353300	353301
388984	388985	388986	388987	388988	388989	388990	388991

Industrial Version IP54*								
Motor Data								
Values at nominal voltage								
1 Nominal voltage	V	18	24	36	48	60	70	70
2 No load speed	rpm	3520	4090	3970	3670	3680	3440	3190
3 No load current	mA	755	697	437	289	231	179	125
4 Nominal speed	rpm	3250	3810	3700	3420	3450	3220	2960
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	427	501	751	800	813	832	839
6 Nominal current (max. continuous current)	A	10	10	9.32	6.8	5.53	4.51	4.21
7 Stall torque	mNm	13600	15700	17400	16100	16200	15100	13700
8 Stall current	A	295	292	207	131	106	78.6	66.1
9 Max. efficiency	%	81	83	87	88	89	89	89
Characteristics								
10 Terminal resistance	Ω	0.0609	0.0821	0.174	0.365	0.568	0.891	1.06
11 Terminal inductance	mH	0.023	0.031	0.076	0.161	0.251	0.393	0.458
12 Torque constant	mNm/A	46	53.7	84.4	123	153	192	207
13 Speed constant	rpm/V	208	178	113	77.8	62.3	49.8	46.1
14 Speed / torque gradient	rpm/mNm	0.275	0.272	0.234	0.231	0.231	0.236	0.223
15 Mechanical time constant	ms	3.98	3.68	3.38	3.25	3.19	3.16	3.13
16 Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	1380	1290	1380	1340	1320	1310	1280



maxon Modular System		Details on catalog page 34	
Planetary Gearhead Ø81 mm 20 - 120 Nm Page 404		Encoder HEDS 5540 500 CPT, 3 channels Page 472	Encoder HEDL 5540 500 CPT, 3 channels Page 474
Other specifications		Encoder HEDL 9140 Page 479	Encoder HEDL 9140 Page 479
29 Number of pole pairs 2		Brake AB 44 Page 524	Brake AB 44 Page 524
30 Number of commutator segments 26		End cap Page 525	End cap Page 525
31 Weight of motor 2100 g			

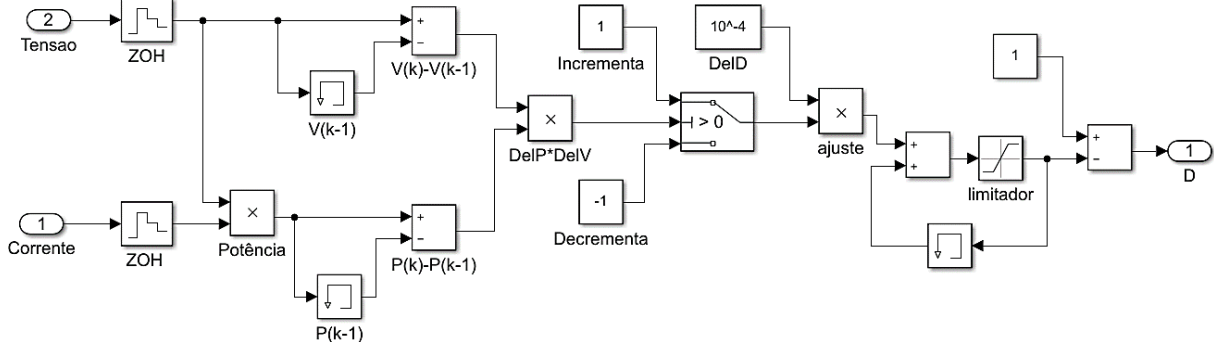
Values listed in the table are nominal. Explanation of the figures on page 72.  
 \* Industrial version with radial shaft seal ring (resulting in increased no load current). IP54 protection only if mounted on brush side, in compliance with maxon modular system.

- Recommended Electronics:  
 Notes Page 34  
 ESCON Mod. 50/5 487  
 ESCON Mod. 50/8 (HE) 488  
 ESCON 50/5 489  
 ESCON 70/10 489  
 EPOS4 Module 50/8 497  
 EPOS4 Module 50/15 497  
 EPOS4 Comp. 50/8 CAN 499  
 EPOS4 Comp. 50/15 CAN 500  
 EPOS4 70/15 501

## Anexo F – Descrição em blocos dos algoritmos de controle utilizados

A Figura 121 apresenta o algoritmo Perturbar e Observar descrito por blocos no *Simulink* para o sistema fotovoltaico.

Figura 121 – Implementação do algoritmo Perturba e Observa para o sistema fotovoltaico



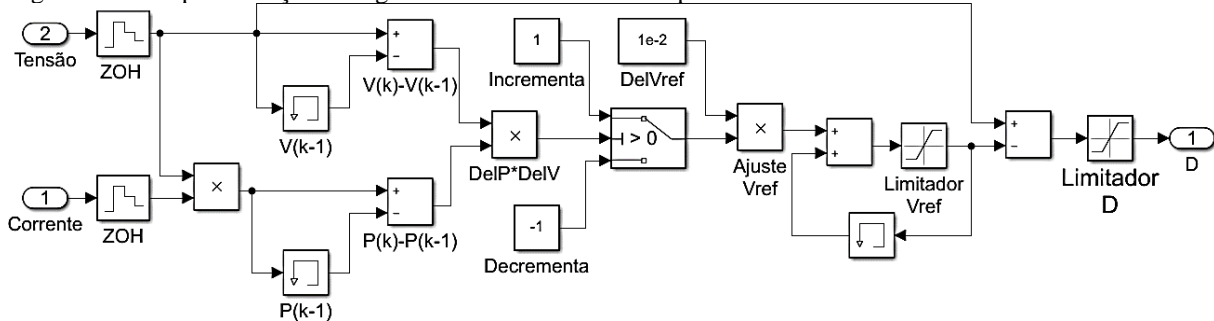
Fonte: O autor, 2020.

Configurações utilizadas:

- ZOH –  $10^{-6}$ ;
- Amplitude de cada ajuste (DelD) –  $10^{-4}$ ;
- Limitador – limite inferior de 0,01 e superior 0,99.

Os blocos internos do método P&O aplicado ao sistema eólico é exibido na Figura 122, o qual tem estrutura similar ao sistema fotovoltaico. Nesse sistema o bloco com o algoritmo foi modificado para gerar uma tensão de referência, que é comparada com a tensão atual e, a partir desse valor, realizar o ajuste do PWM.

Figura 122 – Implementação do algoritmo Perturba e Observa para o sistema eólico



Fonte: O autor, 2020.

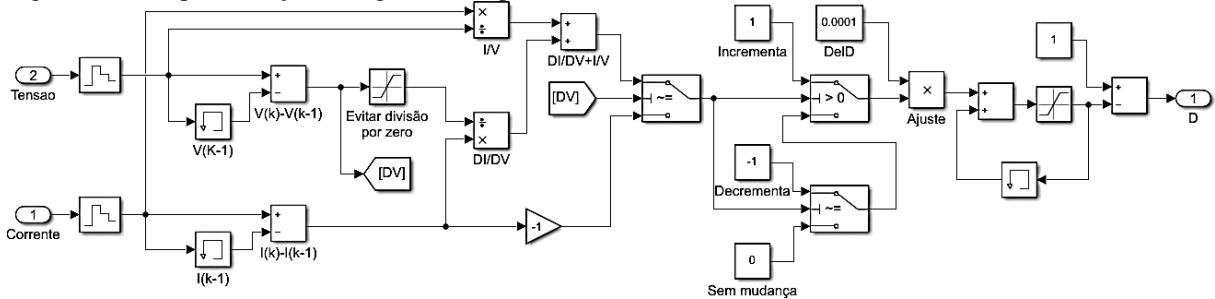
Configurações utilizadas:

- ZOH –  $10^{-4}$ ;
- Amplitude de cada ajuste (DelD) –  $10^{-2}$ ;
- Limitador Vref – limite inferior de 10 e superior 40;
- Limitador – limite inferior de 0,01 e superior 0,99.



A Figura 123 apresenta o algoritmo Condutância Incremental descrito por blocos no *Simulink* para o sistema fotovoltaico e as configurações foram as mesmas utilizadas no P&O.

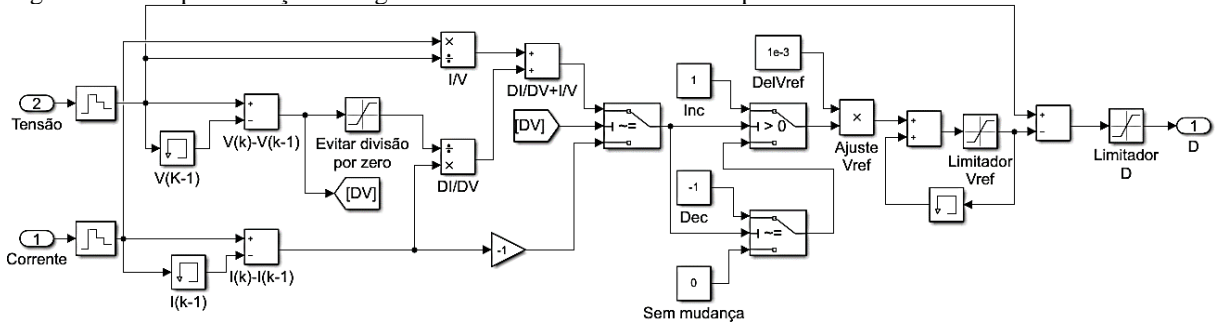
Figura 123 – Implementação do algoritmo CI para o sistema fotovoltaico



Fonte: O autor 2020.

A utilização do algoritmo de busca CI no sistema eólico é apresentada na Figura 124. As configurações são similares ao algoritmo P&O com alteração na amplitude de ajuste para  $10^{-3}$ .

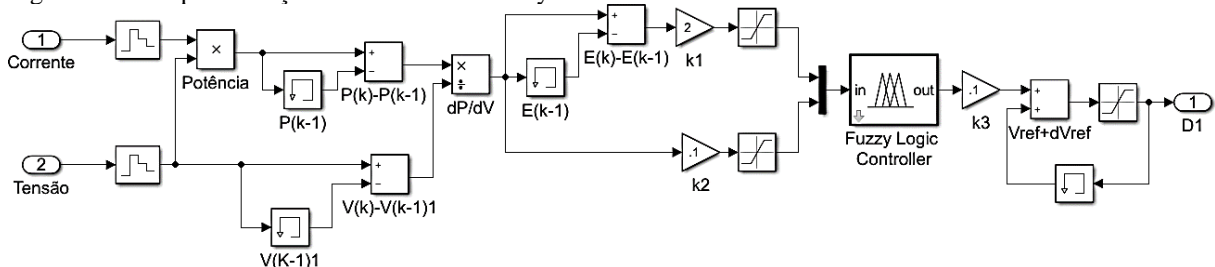
Figura 124 – Implementação do algoritmo Condutância Incremental para o sistema eólico



Fonte: O autor, 2020.

O interior do bloco de controle com lógica *Fuzzy* é apresentado na Figura 125, o qual utiliza informações inseridas na ferramenta do *Matlab* através do bloco “*Fuzzy Logic Controller*”. Os ajustes realizados incrementam a tensão de referência e a diferença entre ela e a tensão atual é usada para alterar o ciclo de trabalho do conversor PWM e a estrutura utilizada foi igual para as duas fontes.

Figura 125 – Implementação do controlador Fuzzy no sistema fotovoltaico



Fonte: O autor 2020.

Configurações utilizadas no sistema fotovoltaico:

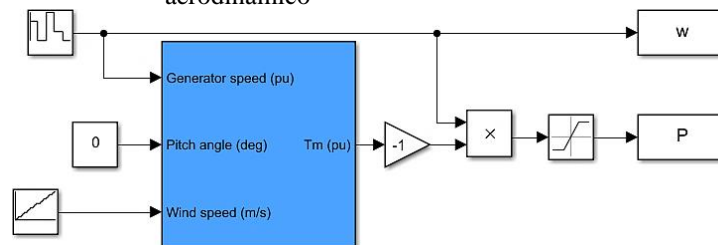
- ZOH –  $10^{-5}$ ;
- $k_1$  – 2;
- $k_2$  – 0,1;
- $k_3$  – 0,1;
- limitador  $k_1$  e  $k_2$  – limite inferior de -1 e superior 1;
- Limitador  $V_{ref}$  – limite inferior de -80 e superior 80.

Configurações utilizadas no sistema eólico:

- ZOH –  $10^{-4}$ ;
- $k_1$  – 0,00125;
- $k_2$  – 0,01;
- $k_3$  – 0,1;
- limitador  $k_1$  e  $k_2$  – limite inferior de -1 e superior 1;
- Limitador  $V_{ref}$  – limite inferior de 10 e superior 40.

A implementação do MPPT utilizando Redes Neurais contou diretamente com a aplicação do bloco gerado pela ferramenta e está descrita no item 5.5.1. A montagem realizada para obter os dados de treinamento do bloco aerodinâmico é exibida na Figura 126.

Figura 126 – Montagem para levantamento de dados do bloco aerodinâmico



Fonte: O autor, 2020.