



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA  
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – IEDS  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**RAIMUNDO ISAQUIEL DE OLIVEIRA RAMOS**

**ESTUDO DE UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE INTERLIGADO À  
REDE ELÉTRICA COM RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA**

**ACARAPE-CE**

**2018**

RAIMUNDO ISAQUIEL DE OLIVEIRA RAMOS

ESTUDO DE UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE INTERLIGADO À REDE  
ELÉTRICA COM RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Projeto de conclusão do curso desenvolvido na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito parcial à obtenção da aprovação na disciplina de trabalho de conclusão de curso I. Área de concentração: Engenharia de Energias.

Orientador: Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho.

ACARAPE

2018

**Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro- Brasileira**

**Sistema Integrado de Bibliotecas da UNILAB (SIBIUNI)**

**Biblioteca Setorial Unidade Acadêmica dos Palmares**

**Catálogo na fonte**

**Bibliotecária: Mônica Cordulina da Silva – CRB-3 / 927**

---

R1165e Ramos, Raimundo Isaquiel Oliveira.

Estudo de um sistema eólico de pequeno porte interligado à rede elétrica com rastreamento do ponto de máxima potência. / Raimundo Isaquiel Oliveira Ramos. Acarape, 2018.

103 f.

Monografia (Graduação) do Curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB.

Orientador: Prof. Dr. Hermínio Miguel de Oliveira Filho.

1. Energia eólica. 2. Eletrônica de potência. 3. Engenharia de energia. I. Título.

CDD 621.45

---

RAIMUNDO ISAQUIEL DE OLIVEIRA RAMOS

**ESTUDO DE UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE INTERLIGADO  
À REDE ELÉTRICA COM APLICAÇÃO DO RASTREAMENTO DO PONTO  
DE MÁXIMA POTÊNCIA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em 27/12/2017.

BANCA EXAMINADORA



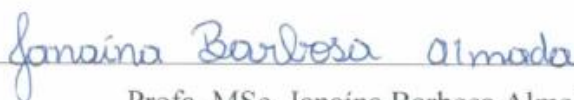
Prof. Dr. Herminio Miguel de Oliveira Filho (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof.ª Dra. Ranoyca Nayana Alencar Leão e Silva Aquino

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)



Prof.ª MSc. Janáina Barbosa Almada

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

## **DEDICATÓRIAS**

*Aos meus pais, Vilany e Sebastião.*

*A minha irmã, Isakelly.*

*À minha namorada, Ilana Alves.*

*Aos meus queridos amigos e familiares.*

*O amor, carinho, a confiança e o incentivo de todos foram essenciais para esta conquista.*

*“Não se pode ensinar nada a um homem; só é possível ajudá-lo a encontrar a coisa dentro de si”.*

***Galileu Galilei***

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus que me deu a vida e me abençoa diariamente para que eu prossiga em minha caminhada.

À minha maravilhosa família, que sempre me apoia e nunca me deixa fraquejar diante das dificuldades.

À minha amada namorada, Ilana Alves que diariamente está comigo e mostra que eu sempre posso alcançar meus objetivos.

Aos meus queridos amigos, que me proporcionaram muitas histórias e aprendizados durante todo esse período de graduação. Amigos estes que serão lembrados por toda minha vida.

Por último e não menos importantes, agradeço aos meus professores e, principalmente, a meu orientador, Hermínio Miguel de Oliveira Filho, por todo conhecimento transmitido. Vocês sempre foram meu horizonte e serviram de guia para que eu alcançasse esse objetivo.

## RESUMO

O estudo realizado ao longo desse trabalho é referente a um sistema de conversão eólico-elétrica de pequeno porte (SCEPP), tomando como referência as características do aerogerador ENERSUD Gerar 246 de 1000W de potência. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizado o levantamento do potencial eólico disponível para uma área de 4,75 m<sup>2</sup>, que é referente a área das pás do Gerar 246, alocados a 45 metros de altura na cidade de Fortaleza-CE. O sistema estudado utiliza um conversor elevador boost, que é conectado em cascata com uma ponte retificadora trifásica *Graetz*, assim é possível a implementação de um Sistema de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*). São apresentadas duas metodologias para o rastreamento deste ponto, o método da Tabela de Busca e o Perturbe&Observe, sendo que apenas este último é simulado e comparado com um sistema de velocidade fixa (Razão Cíclica Fixa). Para a conexão com a rede elétrica é utilizado um inversor PWM monofásico. Durante o estudo do SCEPP são dimensionados todos os circuitos envolvidos na geração e no processamento de energia até a entrega da mesma ao ponto de consumo. Por fim, uma simulação em ambiente computacional utilizando o software PSIM é realizada com o propósito de validar o estudo apresentado.

**Palavras-chave:** Autoprodução. Dimensionamento. Eletrônica de Potência. Energia Eólica. Rastreamento do Ponto de Máxima Potência.

## ABSTRACT

The study carried out during this work refers to a small-scale wind energy conversion system (SCWECS), taking as a reference the characteristics of the a commercial wind turbine ENERSUD, model Gerar 246, rated at 1000W. For the development of this work, a survey of the wind energy potential available for an area of 4.75 m<sup>2</sup> was carried out, which refers to the area constituted by the blades of the aforementioned wind turbine, located 45 meters above in the city of Fortaleza-CE. The system studied uses a boost lift converter, which is cascaded with a three-phase Graetz Rectifier Bridge, so it is possible to implement a maximum power point tracking (MPPT) tracking system. Two methodologies are presented for tracing this point, the method of the search table and the Disturb & Observe, and only the latter is simulated and compared with a fixed speed system (cyclical reason fixed). For the connection to the electric network is used a single-phase PWM inverter. During the study of the SCWECS, all circuits involved in the generation and the processing of energy are scaled up to the delivery of the same to the point of consumption. Finally, a simulation in computational environment using the PSIM software is performed for the purpose of validating the presented study.

**Keywords:** Autoproduction. Sizing. Potency electronic. Wind power. Maximum power point tracking.



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiv
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Objetivos Gerais .....	2
1.2.2 Objetivo Específico.....	2
<b>1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2 - SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 POTÊNCIA DOS VENTOS .....</b>	<b>4</b>
<b>2.3 APLICAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>5</b>
<b>2.4 EVOLUÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS .....</b>	<b>7</b>
<b>2.5 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL .....</b>	<b>10</b>
<b>2.6 GERADORES .....</b>	<b>12</b>
2.6.1 Gerador Síncrono de Imã Permanente (PMSG).....	13
<b>2.7 AEROGERADOR ENERSUD GERAR 246 .....</b>	<b>14</b>
2.7.1 Dimensionamento do Sistema de Geração .....	15
<b>2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 3 - SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE ENERGIA .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 RETIFICADORES .....</b>	<b>18</b>
3.2.1 Retificador Trifásico (Ponte de Greutz).....	19
3.2.1.1 Modelagem do Retificador .....	22
3.2.1.1.1 Projeto do Retificador .....	24
<b>1.2 3.3 CONVERSOR CC-CC.....</b>	<b>25</b>
3.3.1 Conversor Boost.....	26
3.3.1.1 Topologia e Princípio de Funcionamento .....	26
3.3.1.1.1 Primeira Etapa de Operação – Chave Fechada .....	26
3.3.1.1.2 Segunda Etapa de Operação – Chave Aberta .....	28

3.3.1.2	Modelagem do Conversor Boost .....	30
3.3.1.2.1	Projeto do Conversor Boost .....	32
<b>3.4</b>	<b>INVERSOR .....</b>	<b>33</b>
3.4.1	Inversor PWM Senoidal .....	34
3.4.1.1	Modelagem.....	35
3.4.1.1.1	Projeto do Inversor.....	37
<b>3.5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO 4 - MÉTODO DO RESTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA</b>		
	<b>- MPPT .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2</b>	<b>MÉTODO DE MPPT ATRAVÉS DA TABELA DE BUSCAS.....</b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>CONTROLE DO CONVERSOR ATRAVÉS DA RAZÃO CÍCLICA FIXA .....</b>	<b>40</b>
<b>4.4</b>	<b>MÉTODO DE MPPT PELO ALGORITMO PERTURBE &amp; OBSERVE (P&amp;O).....</b>	<b>40</b>
<b>4.5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E SIMULAÇÕES .....</b>		
<b>5.1</b>	<b>SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA .....</b>	<b>44</b>
<b>5.2</b>	<b>OBTENÇÃO DA CURVA DE MÁXIMA POTÊNCIA DO GERADOR EÓLICO .....</b>	<b>47</b>
<b>5.3</b>	<b>RETIFICADOR.....</b>	<b>49</b>
<b>5.4</b>	<b>CONVERSOR BOOST.....</b>	<b>52</b>
<b>5.5</b>	<b>INVERSOR .....</b>	<b>55</b>
<b>5.6</b>	<b>RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA.....</b>	<b>58</b>
5.6.1	Razão Cíclica Fixa .....	58
5.6.2	Perturbe & Observe .....	61
<b>5.7</b>	<b>SIMULAÇÃO COMPLETA DO SISTEMA.....</b>	<b>64</b>
<b>5.8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>69</b>
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO GERAL .....</b>		
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A - MODELO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O</b>		
<b>MPPT DE RAZÃO CÍCLICA FIXA .....</b>		
	<b>APÊNDICE B - MODELO DO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</b>	
<b>PARA ESTUDO DO MPPT ATRAVÉS DO ALGORITMO P&amp;O .....</b>		
	<b>APÊNDICE C - ALGORITMO DO MPPT .....</b>	<b>79</b>

ANEXO A - VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO .....81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Turbina de Poul La Cour.....	8
Figura 2 – Aerogerador Smidth-Putnam (1941).....	8
Figura 3 – Turbina upwind e turbina downwind, respectivamente. ....	9
Figura 4 – Evolução do tamanho dos aerogeradores.....	10
Figura 5 – Evolução da Capacidade Instalada.....	11
Figura 6 – Topologia da máquina síncrona de ímã permanente com fluxo axial. (a) Estrutura construtiva; (b) Vista frontal do estator com seus enrolamentos de armadura; (c) Vista frontal do disco de ímãs que substituem os enrolamentos de campo.....	13
Figura 7 – Aerogerador Gerar 246. ....	14
Figura 8 – Retificador trifásico não controlado do tipo ponte de GREATZ. ....	19
Figura 9 – (a) Tensões das fases e sua respectiva resultante. (b) Corrente em cada diodo da ponte. ....	20
Figura 10 – Representação de 1/6 de período, tendo como referência o eixo das ordenadas para determinação da tensão média na carga.....	20
Figura 11 – Forma de onda da corrente em um dos diodos da ponte retificadora.....	21
Figura 12 – Topologia do Conversor Boost. ....	26
Figura 13 – Primeira Etapa de Operação.....	27
Figura 14 – Segunda etapa de operação – Chave aberta. ....	28
Figura 15 – Inversor monofásico utilizado no trabalho.....	34
Figura 16 – Diagrama esquemático de um sistema eólico munido com MPPT utilizando tabela de busca. ....	39
Figura 17 – Gráfico ilustrativo generalizado do princípio de rastreamento do ponto de máxima potência com o algoritmo Perturbe & Observe. ....	41
Figura 18 – Fluxograma MPPT Eólico por Perturbe e Observe.....	42
Figura 19 – Diagrama de blocos do MPPT. ....	42
Figura 20 – Sistema de geração de energia utilizado na simulação. ....	44

Figura 21 – Respectivas formas de ondas das tensões de fase, linha e da corrente do sistema durante todo o tempo de simulação. ....	45
Figura 22 – Respectivas formas de ondas das tensões de fase, tensões de linha e as correntes do gerador. ....	46
Figura 23 – Modelo de simulação utilizado para obtenção da curva de MPP.....	47
Figura 25 – Curva de Potência x Velocidade do Vento. ....	49
Figura 26 – Modelo do retificador utilizado na simulação do projeto. ....	50
Figura 27 – Respectivas formas de ondas da tensão e da corrente após a retificação. ....	51
Figura 28 – Forma de onda da tensão e da corrente obtidas na saída do retificador após a estabilização do sistema em um período de 0,06s. ....	52
Figura 29 – Modelo do conversor Boost utilizado na simulação do projeto. ....	52
Figura 30 – Formas de onda da tensão do gatilho, corrente e tensão no indutor, corrente e tensão no diodo. ....	53
Figura 30 – Formas de onda da tensão do gatilho, corrente e tensão no indutor, corrente e tensão no diodo (continuação). ....	54
Figura 31 – Formas de onda da corrente e tensão na chave, corrente e tensão da saída dos componentes do conversor Boost. ....	54
Figura 32 – Modelo do inversor utilizado na simulação. ....	55
Figura 32 – Modelo do inversor utilizado na simulação (continuação). ....	56
Figura 33 – Modelo do controlador das chaves utilizado na simulação.....	56
Figura 35 – Formas de onda da tensão na saída do inversor, tensão na carga e corrente na carga, respectivamente.....	57
Figura 35 – Formas de onda da tensão na saída do inversor, tensão na carga e corrente na carga, respectivamente (continuação). ....	58
Figura 36 – Diagrama do sistema para modulação de uma razão cíclica fixa.....	58
Figura 37 – Razão cíclica fixa e tensão dente de serra. ....	59
Figura 38 – Tensão utilizada no chaveamento do conversor boost. ....	60
Figura 39 – Representação da velocidade do vento, razão cíclica fixa e potência processada pelo sistema, respectivamente. ....	60

Figura 39 – Representação da velocidade do vento, razão cíclica fixa e potência processada pelo sistema, respectivamente (continuação). .....	61
Figura 40 – Modelo do MPPT utilizado na simulação. ....	62
Figura 41 – Evolução da razão cíclica ao longo de 25 segundos de simulação. ....	63
Figura 42 - Representação da velocidade do vento, razão cíclica variável e potência processada pelo sistema, respectivamente. ....	63
Figura 42 - Representação da velocidade do vento, razão cíclica variável e potência processada pelo sistema, respectivamente (continuação). ....	64
Figura 43 – Representação do modelo utilizado nesta simulação. ....	65
Figura 44 – Formas de onda dos esforços nos componentes da ponte Greatz. ....	65
Figura 44 – Formas de onda dos esforços nos componentes da ponte Greatz (continuação). .	66
Figura 45 – Curva de Corrente x Tensão ótima do sistema. ....	66
Figura 46– Formas de onda dos esforços nos componentes do conversor Boost. ....	67
Figura 47 – Formas de onda obtidas após a variação da velocidade do vento. ....	68
Figura 48– Formas de onda da tensão e corrente alternada na carga. ....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do Aegerador. ....	15
Tabela 2 – Dados para o dimensionamento do sistema. ....	16
Tabela 3 – Especificações para o projeto do retificador. ....	23
Tabela 4 – Esforços dos Diodos do Retificador. ....	24
Tabela 5 – Especificações do diodo retificador. ....	24
Tabela 6 – Parâmetros do Capacitor. ....	24
Tabela 7 – Especificações do Capacitor Eletrolítico. ....	25
Tabela 8 – Especificações do Capacitor de Polipropileno. ....	25
Tabela 9 – Especificações dos dados para a modelagem do conversor boost. ....	30
Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros para o projeto do conversor boost. ....	30
Tabela 10 – Parâmetros de projeto para a modelagem do conversor boost. ....	31
Tabela 11 – Resultados dos cálculos dos parâmetros do conversor. ....	32
Tabela 13 – Especificações do Interruptor do Conversor. ....	33
Tabela 14 – Especificações do Diodo do Conversor. ....	33
Tabela 15 – Sequência de Chaveamento do Inversor. ....	35
Tabela 17 – Especificações do Mosfet do Inversor. ....	37
Tabela 18 – Resultados calculados e simulados do sistema de geração. ....	44
Tabela 19 – Resultados máximos de tensão, corrente e potência para cada velocidade do vento. ....	48
Tabela 20 – Resultados calculados e simulados do retificador. ....	50
Tabela 21 – Resultados calculados e simulados do conversor Boost CC - CC. ....	53
Tabela 22 – Resultados calculados e simulados do inversor CC - CA. ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIGLA	SIGNIFICADO
<i>SCEEPP</i>	<i>Sistema de Conversão Eólico-Elétrica de Pequeno Porte</i>
<i>UPWIND</i>	<i>Aerogerador a contra o vento</i>
<i>DOWNWIND</i>	<i>Aerogerador a favor do vento</i>
<i>KW</i>	<i>Quilo Watts</i>
<i>MW</i>	<i>Mega Watts</i>
<i>GW</i>	<i>Giga Watts</i>
<i>MWh</i>	<i>Mega Watts hora</i>
<i>GWh</i>	<i>Giga Watts hora</i>
<i>CA</i>	<i>Corrente alternada</i>
<i>CC</i>	<i>Corrente Contínua</i>
<i>CO2</i>	<i>Dióxido de carbono</i>
<i>ICMS</i>	<i>Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços</i>
<i>IPI</i>	<i>Imposto Sobre Produtos Industrializados</i>
<i>II</i>	<i>Imposto de Importação</i>
<i>ANEEL</i>	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
<i>ABEEÓLICA</i>	<i>Associação Brasileira de Energia Eólica</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse-Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)</i>
<i>SLR</i>	<i>Silicon Controlled Rectifier - Transistor</i>
<i>INMET</i>	<i>Instituto Nacional de Meteorologia</i>
<i>MPPT</i>	<i>Rastreamento do ponto de máxima potência</i>
<i>MPP</i>	<i>Ponto de máxima potência</i>
<i>PSMG</i>	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator – Gerador</i>



*Síncrono de Imã Permanente*

*P&O*

*Perturbe & Observe*

*DATASHEET*

*Documento com os dados técnicos dos componentes*

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADE
$V$	<i>Velocidade do vento</i>	<i>m/s</i>
$V_r$	<i>Velocidade do vento na altura de medição</i>	<i>m/s</i>
$H$	<i>Altura de montagem</i>	<i>m</i>
$H_r$	<i>Altura de medição</i>	<i>m</i>
$n$	<i>Coefficiente de rugosidade</i>	<i>-</i>
$E$	<i>Energia cinética</i>	<i>J</i>
$m$	<i>Massa de uma partícula de ar</i>	<i>Kg</i>
$P$	<i>Potência</i>	<i>W</i>
$\Delta T$	<i>Variação de tempo</i>	<i>s</i>
$\dot{m}$	<i>Fluxo de massa</i>	<i>Kg/s</i>
$A$	<i>Área da superfície das pás</i>	<i>m<sup>2</sup></i>
$V$	<i>Velocidade média do vento</i>	<i>m/s</i>
$\eta$	<i>Eficiência</i>	<i>%</i>
$P_o$	<i>Potência nominal do Aerogerador</i>	<i>W</i>
$P_d$	<i>Potência disponível pelo vento</i>	<i>W</i>
$f_g$	<i>Frequência de geração</i>	<i>RPM</i>
$f_e$	<i>Frequência elétrica</i>	<i>Hz</i>
$P$	<i>Número de Polos</i>	<i>-</i>
$V_L$	<i>Tensão de linha RMS</i>	<i>V</i>
$V_f$	<i>Tensão de fase RMS</i>	<i>V</i>
$V_{Cméd}$	<i>Tensão média na carga</i>	<i>V</i>
$T$	<i>Período</i>	<i>s</i>
$I_{Dméd}$	<i>Corrente média no diodo</i>	<i>A</i>

$I_{Cméd}$	<i>Corrente média na carga</i>	A
$P_i$	<i>Potência de entrada</i>	W
$I_{Defi}$	<i>Corrente eficaz no diodo</i>	A
$I_{Dmáx}$	<i>Máxima corrente do diodo</i>	A
$V_{Cmáx}$	<i>Ondulação máxima da tensão na carga</i>	V
$V_{Cmin}$	<i>Ondulação mínima da tensão na carga</i>	V
$V_{DP}$	<i>Máxima tensão reversa no diodo</i>	V
$\Delta V_C$	<i>Variação da tensão na carga</i>	V
$C_1$	<i>Filtro capacitivo do retificador</i>	F
$f_g$	<i>Frequência de geração</i>	Hz
$I_{CI}$	<i>Corrente de pico adicional da capacitância</i>	A
$I_{Pico}$	<i>Corrente de pico nos diodos</i>	A
$I_{Cefi}$	<i>Corrente eficaz de saída</i>	A
$V_I$	<i>Tensão de entrada</i>	V
$V_L$	<i>Tensão no indutor</i>	V
$L$	<i>Indutância</i>	H
$T_{on}$	<i>Tempo de condução da chave</i>	s
$T_{off}$	<i>Tempo em que a chave permanece desligada</i>	s
$D$	<i>Razão Cíclica</i>	-
$V_o$	<i>Tensão de Saída</i>	V
$\Delta i_L$	<i>Variação da corrente no indutor</i>	A
$I_{max}$	<i>Ondulação máxima da corrente</i>	A
$I_{min}$	<i>Ondulação mínima da corrente</i>	A
$f_s$	<i>Frequência de chaveamento</i>	Hz
$I_C$	<i>Corrente no capacitor</i>	A

$I_o$	<i>Corrente de Saída</i>	A
$RC$	<i>Resistência do conversor</i>	$\Omega$
$I_{in}$	<i>Corrente de entrada do conversor</i>	A
$R_{se\_m\acute{a}x}$	<i>Resistência em série</i>	C
$E$	<i>Tensão de entrada</i>	V
$P_o$	<i>Potência de saída</i>	W
$R$	<i>Resistência de carga</i>	$\Omega$
$V_{f\grave{m}nv}$	<i>Tensão de fase eficaz</i>	V
$ICH(RMS)$	<i>Corrente eficaz na chave</i>	A
$I_o(RMS)$	<i>Corrente eficaz na saída</i>	A
$V_{AB}$	<i>Tensão entre as fases A e B</i>	V
$V_{BC}$	<i>Tensão entre as fases B e C</i>	V
$V_{CA}$	<i>Tensão entre as fases C e A</i>	V
$V_{CH}$	<i>Tensão reversa na chave</i>	V
$D$	<i>Diodo</i>	-
$C_o$	<i>Filtro capacitivo do Boost</i>	F
$R_o$	<i>Resistor do Boost</i>	$\Omega$
$D1 \text{ a } D6$	<i>Diodos</i>	-
$V_{AB}, V_{AC}, V_{BA},$ $V_{BC}, V_{CA}, V_{CB}$	<i>Tensões entre fases</i>	V

---

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 INTRODUÇÃO GERAL

A energia é a força elementar e o meio pelo qual se constrói toda a cultura humana a qual tem sua jornada evolucionária baseada no uso da energia disponível, ou seja, o progresso humano vem se consolidando ao longo dos anos em função da capacidade de captar cada vez mais energia e, com isso, estender seu poder e aumentar o próprio bem-estar [1].

Como já é de conhecimento, a energia não é criada e não pode ser destruída, ela é convertida a partir das fontes primárias naturais que são 4: a energia nuclear, proveniente dos átomos, a eletromagnética que está associada à união atômica das partículas, a energia cinética, que tem relação com os corpos em movimento e, por último, a potencial, associada à gravidade. As demais fontes energéticas conhecidas como solar, hidrelétrica e eólica, por exemplo, são resultados de interações naturais com os fenômenos físicos relacionados às 4 primeiras mencionadas. Após a interação do homem, as fontes primárias são convertidas em secundárias e a elétrica e mecânica são exemplos desse tipo de energia, as quais são mais utilizadas para a realização de trabalho [2].

Segundo [3], a demanda por energia deve sofrer um crescimento na ordem de 30% até o ano de 2035, tomando como base os dados do ano de 2015. Como a energia elétrica é uma forma mais nobre, a necessidade desse tipo de energia deve aumentar em taxas maiores do que ao crescimento de demanda por energia [4]. A questão central no tocante ao aumento da demanda energética se dá com relação a como essa questão será atendida, o que, por razões ambientais e energéticas, pressionam os países desenvolvidos a buscarem a diversificação de sua matriz, ainda dominada por fontes não renováveis, que durante sua utilização liberam grandes massas de gases, os quais são contribuinte para o efeito estufa e, conseqüentemente, para as mudanças climáticas. Com isso, convivemos em meio a grande busca por sustentabilidade energética, consumo de energia consciente e, principalmente, a busca por novas fontes de energias que não tragam conseqüências severas ao meio ambiente, assim, as fontes renováveis proporcionam ao planeta a oportunidade de reduzir as emissões de gases nocivos e tomar como objetivo o desenvolvimento econômico em paralelo ao equilíbrio ambiental.

O Brasil é destaque na utilização de fontes renováveis na sua matriz energética. Em 2016, segundo [5], 43,5% da energia consumida em todo país foi gerada por fontes renováveis. De toda a energia consumida no mesmo ano, 17,5% corresponde à energia elétrica em que 68,1% desta é derivada somente das hidrelétricas, porém a energia eólica

assume uma posição categórica dentre as demais, principalmente no cenário atual em que as hidrelétricas se encontram na situação de geração reduzida, visto que não há água suficiente para manter a geração em níveis nominais, resultando no decréscimo da geração se comparada ao ano de 2015. Portanto, a energia eólica foi a que mais se desenvolveu, atendendo a 5,4 % da demanda por energia elétrica em 2016, 1,9 % a mais do que no ano de 2015 [5].

Em razão do que foi supracitado e sabendo que o Brasil tem grande potencial para maior disseminação da energia eólica, a autoprodução de energia através de sistemas eólicos configura-se como ótima alternativa para atender essa demanda, com isso, conseguir alargar a participação das fontes renováveis na matriz energética nacional. Deste modo, este trabalho busca a implementação de um sistema de energia renovável por meio da conversão eólio-elétrica a consumidores de pequeno porte, além do enfoque no sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT), ocasionando o máximo aproveitamento do potencial fornecido pelo vento. Com isso, espera-se proporcionar autonomia energética aos consumidores, a certeza de estarem consumindo energia limpa que pode ser gerada 24 horas por dia e, além de tudo, o compromisso de estarem contribuindo para a preservação do meio ambiente.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivos Gerais**

O objetivo central deste trabalho se dá na conversão eólio-elétrica de energia através de um aerogerador de pequeno porte que é aplicado para o fornecimento de energia elétrica para uma carga, implementação do algoritmo Perturbe&Obeserve para o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) e no dimensionamento dos conversores eletrônicos.

### **1.2.2 Objetivo Específico**

- Compreender o princípio da conversão e processamento de energia elétrica do sistema, através dos estudos do retificador, conversor cc-cc e inversor;
- Dimensionar os componentes eletrônicos para atender a uma determinada demanda de potência elétrica;
- Simular o sistema de pequeno porte até a entrega da energia a carga;
- Gerar a curva de potência do Aerogerador.
- Implementar técnica de rastreamento do ponto de máxima potência ao aerogerador;

- Prover um ambiente de simulação para um SCEEPP, no qual seja possível experimentar várias técnicas de MPPT;

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO**

O texto presente neste trabalho foi organizado em 6 capítulos, incluindo o de introdução e conclusão do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a evolução histórica e tecnológica das turbinas eólicas, as equações gerais para o dimensionamento de um sistema eólico, assim como o próprio dimensionamento do sistema utilizado. Por fim, este capítulo traz as atualizações do setor eólico brasileiro.

No Capítulo 3 são apresentados e dimensionados todos os componentes envolvidos no processamento de energia do sistema: retificador, conversor e por último, o inversor.

O Capítulo 4 traz algumas técnicas empregadas para o rastreamento do ponto de máxima potência do sistema, assim como mostra as vantagens e desvantagens dos mesmos e, por último, mostra o dimensionamento da técnica utilizada.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações e por último, as conclusões com proposta de um trabalho futuro.

O Capítulo 6 traz a conclusão geral do trabalho.

## **CAPÍTULO 2 - SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

A conversão eólico-elétrica é uma forma de produção de eletricidade que tem como combustível o vento, ou seja, é obtida a partir do movimento de uma massa de ar, que nada mais é do que a mistura de diversos gases, principalmente nitrogênio e oxigênio presentes na atmosfera terrestre [2]. O movimento dessas massas de ar se dá por conta do aquecimento da superfície terrestre nas proximidades a linha do Equador e ao resfriamento da mesma superfície nas regiões dos polos, dessa forma os ventos frios circulam dos polos em direção à linha do equador e o ar quente, por sua vez, desloca-se para os polos [1].

A força dos ventos já vem sendo aproveitada para as mais diversas finalidades desde os tempos antigos. Segundo [6], há estimativas que a partir da Idade Média, as forças aerodinâmicas de sustentação passaram a ser utilizadas em maior escala, permitindo o advento das grandes navegações e também maior eficiência às máquinas eólicas. Neste período as máquinas eólicas se tratavam dos moinhos de vento que possuem origem remota e incerta. Existem registros desses moinhos por volta de 200 a.C na Pérsia, os quais eram utilizados para a moagem de grãos e bombeamento de água. Eram moinhos primitivos com configuração de eixo vertical na qual extrai a energia do vento com baixa eficiência [7].

Ao longo dos anos as máquinas que aproveitam a energia do vento foram se modernizando e ganhando outra aplicação além da moagem de grãos e bombeamento de água, a geração de energia elétrica. Questionamentos são travados para saber como a força dos ventos pode gerar eletricidade. Essa geração se dá através da conversão eólico-elétrica que por sua vez, caracteriza-se da seguinte maneira: para que haja a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica é necessário que através da aerodinâmica empregada em uma peça, nas hélices que são presas em um eixo, venham a rotacionar quando atingidas pelo fluxo de ar, assim, girando o eixo que é acoplado a um gerador elétrico. O gerador é o responsável por através da energia mecânica, gerar energia elétrica.

### **2.2 POTÊNCIA DOS VENTOS**

Para a geração de eletricidade a partir do sistema de conversão eólico-elétrico, precisa-se considerar uma série de fatores os quais são fundamentais para o bom aproveitamento dos recursos naturais e, conseqüentemente, ter ótimo aproveitamento do capital investido.

O ponto fundamental para a geração otimizada se dá no conhecimento das características do vento. É necessário conhecer as variações de velocidade, os parâmetros que



influenciam o perfil do vento e suas alterações, além da direção do fluxo de ar, assim, a estrutura conversora de energia pode ser dimensionada de acordo com as características do local da implantação, evitando que sinistros a danifiquem.

Os dados da velocidade do vento são obtidos através do anemômetro, geralmente esse instrumento é posicionado a certa altura no qual fica registrando os valores da velocidade durante um tempo determinado. Quanto maior o intervalo de tempo em que há dados registrados, melhor para o projeto.

Segundo [7], a velocidade do vento aumenta com a altura, havendo a necessidade de correção desta para os casos em que os aerogeradores possuem altura maior do que a altura de coleta dados de velocidade do vento, altura do anemômetro. Para isso, utiliza-se um modelo matemático que é apresentado em (2.1).

$$V = V_r \cdot \left(\frac{H}{H_r}\right)^n \quad (2.1)$$

O coeficiente  $n$  varia de 0,1 (superfície lisa, lago ou oceano) a 0,4 (áreas residenciais).

A potência contida nos ventos é definida como a razão pela qual a energia é usada ou convertida por unidade de tempo, joule/s, conseqüentemente a unidade da potência é watt (W) que equivale a 1 joule/s de acordo com o Sistema Internacional de unidade (SI) [1]. Como já mencionando, o vento é o resultado do movimento das massas de ar e, a energia relacionada a este movimento é a cinética a qual sua equação é mostrada em 2.1 e a potência em 2.3.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \text{ (joules)} \quad (2.2)$$

$$P = \frac{E}{\Delta T} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V^2 \quad (2.3)$$

Como o fluxo de massa de ar passa pela área circular do plano das pás com certa velocidade  $V$ , então tem-se um volume de ar que passa por essa área a cada segundo, com isso, a multiplicação entre a massa específica do ar, a área do plano das pás e a velocidade do vento, tem como resultante o fluxo de massa de ar presente na equação (2.3) e, substituindo os termos dessa equação, tem-se como resultado a equação (2.4).

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.4)$$

### 2.3 APLICAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As primeiras tentativas em utilizar artifícios aerodinâmicos para geração de energia elétrica se deram por conta de Poul La Cour, um professor da cidade de Askov em 1891 na Dinamarca. Este professor acoplou uma turbina eólica a um gerador de corrente contínua. Anos seguintes às turbinas produzidas por Poul La Cour, eram responsáveis por fornecer

energia a áreas rurais. Por volta do ano de 1930 nos Estados Unidos, fizeram a atualização dos moinhos de ventos para o cata-vento de multipás, com isso, Jacobs, projetou pequenos aerogeradores que eram utilizados para o carregamento de baterias, o que por alguns anos até a implantação do Projeto de Eletrificação Rural, foi a fonte de energia para áreas que não possuíam acesso a rede pública de energia. O aerogerador desenvolvido por Jacobs era composto de três pás tipo hélice fabricadas em madeira, controle centrífugo de passo e diâmetros de 4 metros gerando entre 1,8 a 3 kW [7].

Enquanto nos Estados Unidos eram utilizados geradores de pequeno porte para aplicação em áreas rurais não cobertas pela rede, a Rússia investia em aerogeradores de médio e grande porte interligados diretamente a rede. No período foi criado o gerador Balaklava, um avançado modelo de três pás com uma torre de 30 metros, que produzia 100 kW de potência [8].

Após a Segunda Guerra Mundial, os investimentos nos programas destinados a pesquisas e desenvolvimento dos aerogeradores sofreram brusca queda, efeito da competição econômica travada entre as grandes usinas hidrelétricas e as termelétricas movidas a combustíveis fósseis, em que na época o preço desses combustíveis eram imbatíveis, tornando-os economicamente mais atrativos que outras formas de geração de energia elétrica, além de que não havia nenhuma preocupação com relação ao controle do consumo dos combustíveis de origem fóssil por associação a grandes impactos ambientais, ocasionados pela emissão de gases do efeito estufa proveniente do consumo de tais combustíveis. Com isso, os investimentos para os aerogeradores foram destinados apenas ao aprimoramento aerodinâmico na operação e desenvolvimento das pás e aperfeiçoamento no sistema de geração [1].

A partir da década de 70, período em que o setor petrolífero entrou em crise, houve grande interesse por parte de países pertencentes ao continente europeu e dos Estados Unidos em incentivar pesquisas destinadas ao desenvolvimento de novas fontes alternativas para a geração de energia, e assim minimizar a dependência dos países produtores de petróleo. Outros fatores também eram influenciadores para o desenvolvimento de novas fontes energéticas, como a indisponibilidade de recurso hídrico em alguns países, aspectos ambientais associados à queima dos combustíveis de origem fóssil e a opinião pública se mostrando contrária a utilização da energia nuclear, tais fatores foram decisivos e levaram diversos países a optar por incentivar as fontes renováveis em sua matriz energética [6].

O Brasil teve seu primeiro aerogerador instalado no ano de 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha, na ocasião foi instalado uma turbina de três pás de 8,5 metros de raio

totalizando um diâmetro de 17 metros, essa turbina possuía uma torre de 23 metros de altura e era responsável por produzir uma potência de 225 KW [9].

## **2.4 EVOLUÇÃO DAS TURBINAS EÓLICAS**

A partir do século XII, os moinhos de vento, que eram de eixo vertical, foram evoluindo e passaram a ser de eixo horizontal do tipo holandês, os quais começaram a ser utilizados em larga escala em diversos países da Europa, como a Inglaterra, França e Holanda. No mesmo continente, os moinhos exerceram forte e decisiva influência para a disseminação da economia agrícola, substituindo por vários séculos a força humana e animal que eram aplicadas para moagem de grãos. Já no século XVII, a Holanda começou a utilizar de artifícios aerodinâmicos para moagem de grãos, isso através dos moinhos de vento, tais artifícios também eram empregados para drenagem de suas terras, já que boa parte das terras deste país se encontram abaixo do nível do mar. No século XIX, com a disseminação da máquina a vapor, iniciou o declínio dos moinhos na Holanda e em outros países europeus. No século XX, nos Estados Unidos, mesmo com a crise relacionada aos moinhos de vento, houve uma expansão de sua utilização em função do bombeamento de água para áreas que não possuíam reservas hídricas. A partir disso, o que antes eram enormes e pesadas construções, com o aperfeiçoamento, foi proporcionado o desenvolvimento de equipamentos mais simples, leves e, conseqüentemente mais baratos o que levou ao desenvolvimento dos cata-ventos de múltiplos pás que foram amplamente utilizados no bombeamento de água por várias partes do mundo [8].

O grande advento da energia eólica nos dias atuais se deu através da evolução de suas turbinas e de toda tecnologia que nela é empregada. Frente a isso, vale ressaltar que esse desenvolvimento não se deu apenas com a conexão de um rotor movido por forças aerodinâmicas a um gerador, mas veio sucedendo-se desde a sua descoberta.

Nesse contexto, a partir da crise do petróleo aos dias atuais, foi o período em que a energia por esta fonte mais se desenvolveu e teve sua maior disseminação, sendo comparada ao tempo de dominância dos moinhos de vento na Europa, porém a aplicação atual dos aerogeradores se dá em âmbito global.

Como já mencionado, o primeiro marco da geração de energia elétrica a partir da conversão eólica se deu na Dinamarca por Poul La Cour, suas turbinas foram construídas em vários tamanhos e possuíam 4 pás com diâmetro de até 20 metros, essas turbinas geravam entre 10 e 35 kW de potência.

No mesmo período em que Poul La Cour desenvolvia suas turbinas com várias pás, a Empresa F.L. Smidth fabricava turbinas com rotores de 17,5 metros de diâmetro compostos por 2 pás que eram construídas em madeira laminada, já projetadas para o melhor aproveitamento aerodinâmico, gerando com velocidade do vento de 11 m/s, 50 kW.

A figura 1 que é apresentada a seguir, traz uma representação das turbinas projetadas por Poul La Cour. Já na figura 2 há um exemplo da uma das turbinas desenvolvidas pela empresa F.L Smidth.

Figura 1 – Turbina de Poul La Cour.



Fonte: Linha do tempo eólica, 2016.

Figura 2 – Aerogerador Smidth-Putnam (1941).



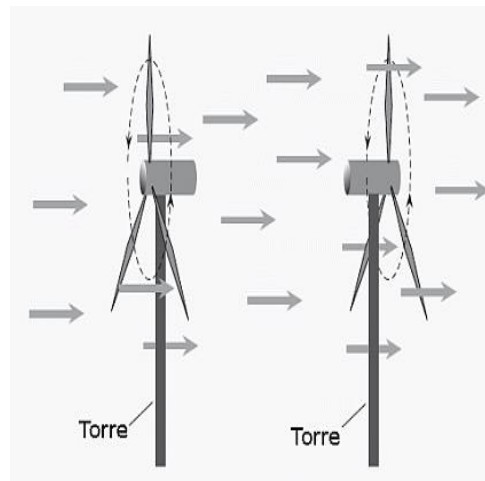
Fonte: [7].

Na Alemanha, antes da I Guerra Mundial, foi dado início a fabricação de turbinas eólicas, porém eram apenas cata-ventos múltiplos, conhecidos até os dias atuais, aplicados à geração de eletricidade. Com isso, foi percebido que a aplicação desses cata-ventos que giram com alto torque e em baixa velocidade, não eram eficientes para a geração de energia elétrica, assim, em 1920, Albert Betz provou que a máxima eficiência teórica obtida do aproveitamento da energia dos ventos por um disco circular, sendo essa eficiência na ordem de 59,3%. Nunca nenhuma turbina conseguiu chegar a esse número, as atuais ficam na média de 35% [10].

Em decorrência da crise do petróleo da década de 70, os investimentos destinados ao avanço tecnológico das turbinas eólicas que tinham sido cortados, foram retomados e disseminados por vários países do mundo, sempre buscando melhor eficiência na conversão e maior potência na geração. Com isso, diversos estudos foram travados a fim de desenvolver sempre novas tecnologias a serem empregadas nas turbinas.

Várias foram as ideias para evolução das turbinas, sendo elas motivo de pesquisas para comprovação se eram viáveis ou não. Em decorrência disso, diversos projetos foram criados em busca do desenvolvimento das turbinas eólicas, que resultaram em alguns tipos de turbinas, como as já citadas de eixo vertical e horizontal, assim como as turbinas upwind, que são as mais comuns e tem o plano de rotação das pás posicionado contra a direção do vento, sendo necessário a utilização de um sistema de orientação para posicionar o plano das pás de tal forma que fique perpendicular à direção do vento. Já as turbinas downwind, que possuem o rotor posicionado a favor do vento, não utilizam mecanismos de orientação para posicionamento. A figura 3 traz a representação das turbinas upwind e downwind.

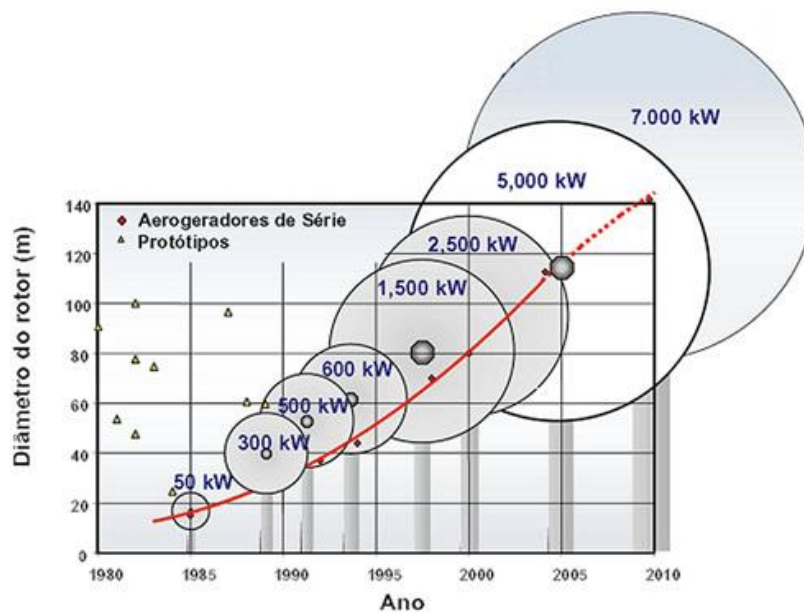
Figura 3 – Turbina upwind e turbina downwind, respectivamente.



Fontes: ESAS Renováveis; Ambiente Magazine; Siemens.

Nos últimos 10 anos, o mercado das turbinas eólicas conseguiu grande e rápido avanço tecnológico sendo sempre possível o aumento no tamanho das turbinas, com isso, as turbinas modernas são altamente confiáveis e devido a seu aparato tecnológico de ponta, elas a cada dia ficam mais silenciosas e gerando mais potência. Como exemplo, tem-se a turbina V164 que é produzida pela Vestas e tem uma altura de 220 metros, gerando 8 MW de potência. A figura 4, mostra a evolução do tamanho das turbinas e sua respectiva potência nominal.

Figura 4 – Evolução do tamanho dos aerogeradores.



Fonte: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=tutorial\\_eolica](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=tutorial_eolica).

Portanto, o mercado da energia eólica cresceu e vem crescendo a cada dia, sempre trazendo novas inovações, projetos cada vez mais ambiciosos e sempre quebrando recordes com relação à geração de anos anteriores.

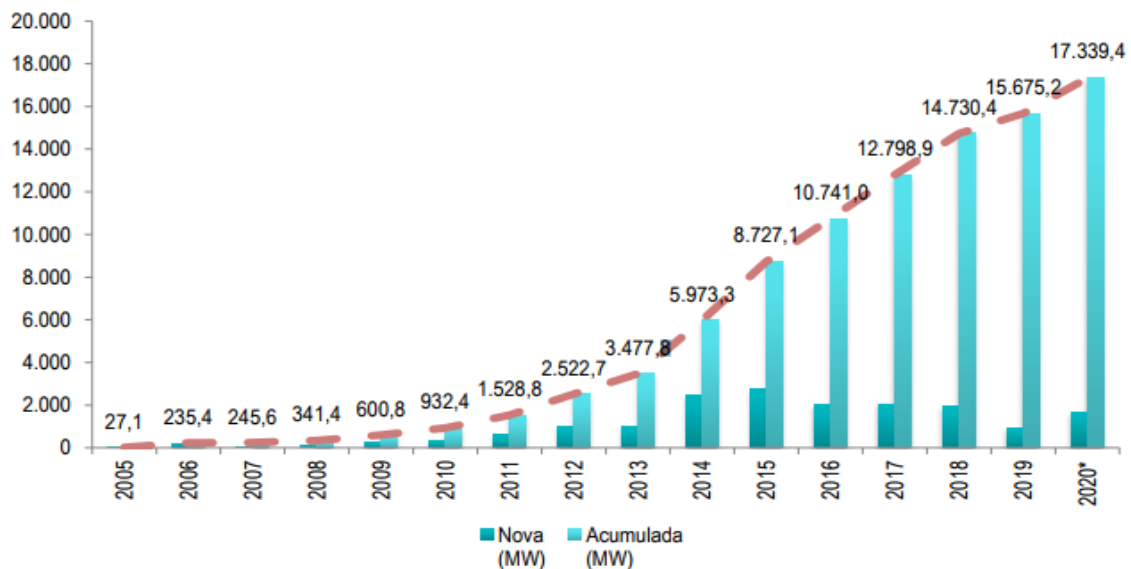
## 2.5 ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

No ano de 2015 o setor eólico foi responsável por entregar ao Sistema Integrado Nacional (SIN), 21,37 TWh de energia, sendo essa geração 80% maior do que o gerado em 2014. Os ótimos resultados obtidos por essa fonte dar-se-á em grande escala aos admiráveis ventos brasileiros que são responsáveis por além da grande capacidade de geração, manter os custos da energia eólica muito competitivos, levando o Brasil a ter menores valores por megawatt hora (R\$/MWh) em relação aos demais países, e atualmente é a segunda fonte energética mais barata, perdendo apenas para as hidrelétricas [9].

Já ocupamos a 5ª posição do ranking mundial em capacidade instalada e a 7ª posição com relação à geração de energia por fonte eólica. China, Estados Unidos e Alemanha ocupam, respectivamente, o 1º, 2º e 3º lugares deste ranking de produção. Essa posição veio por conta da grande quantidade de novos parques eólicos que foram instalados atualmente, totalizando em dezembro de 2017, 503 usinas, somando uma capacidade instalada de 12,64 GW. Com isso, 8,1 % da matriz elétrica brasileira é proveniente da energia dos ventos, o que significa que serão deixados de emitir aproximadamente 21.823.688 T/ano de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Não esquecendo que por motivo da grande geração por fonte eólica, houve a redução da geração de energia térmica de alto custo, simbolizando uma economia de R\$ 645 milhões no ano de 2015 [11].

Ao olhar para a curva de capacidade instalada da fonte eólica exposta na figura 6, percebe-se o virtuoso crescimento obtido por esta fonte ao longo dos anos, isso se deu por vários fatores já expostos ao longo desse trabalho. Em vista disso, é previsto que ao final do ano de 2020 o Brasil tenha 17,33 GW de potência instalada, sendo que os dados são consolidados a partir das capacidades contratadas nos ambientes de contratação, além da capacidade instalada para pesquisa e desenvolvimento [12]. Na figura 5 é exposta a evolução da capacidade de geração de energia instalada.

Figura 5 – Evolução da Capacidade Instalada.



Fonte: [11].

Ultimamente, a implantação de unidade geradora para consumo próprio vem se tornando cada vez mais uma boa alternativa para abastecimento de energia elétrica por parte dos consumidores de pequeno porte. O Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ)

passou a permitir que os Estados deixem de cobrar duas vezes o ICMS incidente sobre a energia gerada e consumida, com isso, consumidores que possuem unidades geradoras, passaram a pagar o ICMS somente referente à diferença entre a energia consumida e a gerada [13].

Ainda sobre o setor de autoprodução, tramita o Projeto de Lei 5539/2013 de autoria de Júlio Campos, em que desonera do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) e do Imposto de Importação (II) os bens de capital e o material de construção utilizado para a implantação desse tipo de atividade. Contudo, além de ficar isento do pagamento do ICMS, o consumidor que instalar unidades geradoras em seu ponto de consumo e conseguir gerar mais energia do que consumir, poderá trocar energia com a distribuidora local com o objetivo de reduzir o valor da tarifa de energia elétrica, ou seja, ele gera um crédito com a distribuidora, com isso, esse crédito por ser utilizado em faturas futuras quando seu consumo for maior que a geração, ou pode ser descontado da conta de outra unidade consumidora que esteja cadastrada no nome do mesmo proprietário, conforme está previsto no Sistema de Compensação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) [14]. Além do que foi exposto anteriormente, será abatida da conta do consumidor com a distribuidora a energia gerada por sua central de autoprodução, sendo esta uma das maiores motivações para a implantação da microgeração de energia.

## **2.6 GERADORES**

As máquinas rotativas podem ter duas aplicações: transformar energia elétrica em energia mecânica, princípio do motor, ou serem utilizadas como geradores, quando transformam energia mecânica em elétrica. Visto que o objetivo deste trabalho é a geração de energia elétrica, esta máquina será aplicada como gerador em que a energia do vento será convertida de cinética para mecânica através das pás, que por sua vez fornece essa energia mecânica para o rotor do gerador, que por fim gera eletricidade a qual deve ser fornecida aos centros de consumo.

Os geradores são máquinas rotativas que geram tensão através do movimento mecânico dos enrolamentos, sendo estes constituídos por grupos de bobinas em que a tensão é gerada quando essas bobinas giram dentro de um campo magnético. Também pode-se gerar tensão quando esses enrolamentos são fixos e um campo magnético gira próximos a esses enrolamentos, ou ainda quando o circuito magnético é projetado de modo que a relutância varie com a rotação do rotor. Por meio desses métodos, há a alteração cíclica do fluxo concatenado em uma bobina, assim uma tensão variável no tempo é gerada [15].



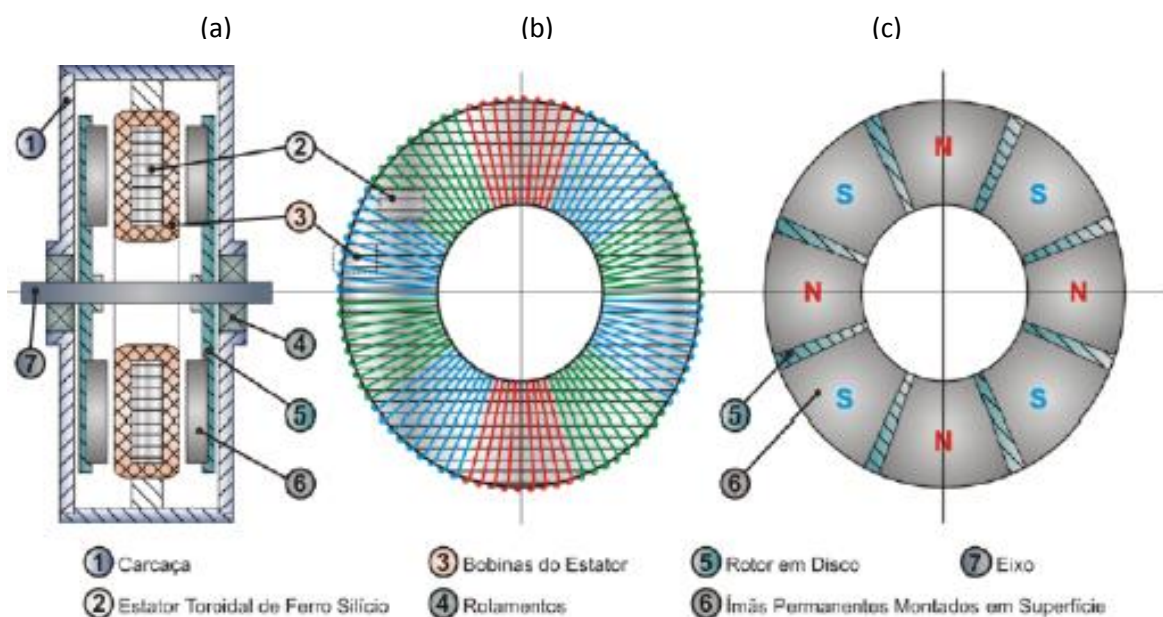
Os geradores podem ser classificados quanto ao fornecimento de energia. As máquinas CC, que fornecem tensão em corrente contínua e os que fornecem tensão em corrente alternada (máquina CA). Para esta aplicação, será utilizada a máquina CA. Além da diferença no fornecimento de tensão em CC ou CA, os geradores ainda são divididos de acordo com o modelo, potência de operação e as condições para sua utilização. Especificamente para os geradores CA, estes podem ser divididos em síncronos e assíncronos.

Por motivo das massas de ar se deslocarem em velocidade variável, a aplicação do gerador síncrono é mais viável, pois há a possibilidade de controlar, por meio da excitação, a tensão, a potência ativa e reativa gerada e, além de reduzir as cargas dinâmicas, essa operação permite o melhor aproveitamento das propriedades aerodinâmicas do rotor eólico com relação à operação em velocidade constante [7].

### 2.6.1 Gerador Síncrono de Ímã Permanente (PMSG)

Neste tipo de gerador o enrolamento de armadura é alocado no estator, enquanto os ímãs são colocados no rotor e deste modo, giram juntamente com ele. Assim, as máquinas síncronas de ímã permanente são semelhantes às máquinas síncronas tradicionais, exceto pelos enrolamentos de campo, que são substituídos por ímãs permanentes. Na figura 6 encontra-se a topologia do gerador síncrono de ímã permanente com fluxo axial.

Figura 6 – Topologia da máquina síncrona de ímã permanente com fluxo axial. (a) Estrutura construtiva; (b) Vista frontal do estator com seus enrolamentos de armadura; (c) Vista frontal do disco de ímãs que substituem os enrolamentos de campo.



Fonte: [6].

A geração desta máquina se dá por conta da movimentação dos ímãs pertencentes à excitatriz em torno dos enrolamentos de armadura, com isso, o campo magnético permanente dos ímãs, ao variar com as revoluções do rotor, faz com que o fluxo concatenado dos enrolamentos da armadura seja variante no tempo, com isso, uma tensão senoidal será produzida na saída do gerador.

Esta máquina pode ser do tipo que produz fluxo axial ou radial, para o caso será utilizada a de fluxo axial, que possui rotor e estator em forma de disco e seu diâmetro é maior, ocasionando alto momento de inércia. Por motivo de o rotor possuir diâmetro maior, pode-se acomodar maior número de polos, podendo assim, operar em baixas rotações, condizentes aos momentos em que as massas de ar perdem velocidade e sopram com menos intensidade [2].

Esse é o tipo de gerador que é muito utilizado para aplicação na conversão de energia eólico-elétrica, principalmente em sistemas de pequeno porte, mostra-se bastante eficiente, possuindo grande capacidade de geração mesmo quando a velocidade de rotação é baixa [6].

## **2.7 AEROGERADOR ENERSUD GERAR 246**

Este é o aerogerador de 1kW de potência que é produzido pela empresa ENERSUD. Para gerar energia, ele utiliza um gerador síncrono de ímã permanente, similar ao que foi descrito no item anterior. Para converter à energia contida nos ventos e fornecer potência a carga, o Gerar 246 dispõe de 2,46 metros de diâmetro das pás. A Figura 7 traz uma imagem ilustrativa do aerogerador utilizado neste trabalho.

Figura 7 – Aerogerador Gerar 246.



Fonte: ENERSUD.

O gerador da ENERSUD tem capacidade de fornecer uma tensão de 75 volts a uma velocidade nominal de 12 m/s, além de possuir velocidade de partida na ordem de 2,2 m/s. A tabela 1 que é apresentada a seguir traz as características do mecanismo de conversão de energia cinética em energia mecânica, além das características do gerador.

Tabela 1 – Dados do Aegerador.

<b>Dados do sistema de conversão de energia</b>	
<b>Número de Pás</b>	3
<b>Diâmetro da Hélice</b>	2,46 m
<b>Controle de Estol</b>	Estol Ativo
<b>Proteção para Altas Velocidades</b>	Controle de Passo
<b>Dados do Gerador</b>	
<b>Número de Polos</b>	14
<b>Rotação Nominal</b>	700 rpm
<b>Potência Nominal a 12m/s</b>	1000 W
<b>Velocidade de Partida</b>	2,2 m/s
<b>Tensão de Fase-Neutro (700 rpm)</b>	75 V
<b>Frequência (700 rpm)</b>	80 Hz
<b>Gerador</b>	Síncrono de Ímã Permanente
<b>Tipo de Ímã do Gerador</b>	Neodímio-Ferro-Boro
<b>Sistema Elétrico</b>	Trifásico

Fonte: ENERSUD.

### 2.7.1 Dimensionamento do Sistema de Geração

Com posse dos dados de velocidade do vento, entre janeiro de 2010 a setembro de 2017, da cidade de Fortaleza, que foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia, pôde-se alcançar a média histórica de velocidade do vento, com isso, há uma noção do aproveitamento do aerogerador especificado no item anterior. Consta no apêndice A todas as medidas mensais de velocidade do vento no período de tempo supracitado.

A média histórica de velocidade resultou em:

$$\underline{V} = 5,71 \text{ m/s} \quad (2.5)$$

Sabendo que os dados de velocidade são obtidos a uma altura de 10 metros e, considerando que o aerogerador será instalado na cobertura de um edifício de 15 andares, cuja altura é igual a 42 metros adicionados a 3 metros da torre de sustentação do aerogerador, assim a altura final de instalação será de 45 metros, dessa forma, utilizou-se a equação 2.1 para corrigir a velocidade do vento na altura desejada.

A tabela 2, traz os dados para o dimensionamento do sistema.

Tabela 2 – Dados para o dimensionamento do sistema.

Dados para dimensionamento do Sistema	
Local de aplicação	Fortaleza - Ce
Altura de montagem	45 metros
Média histórica da velocidade do vento	5,71 m/s
Coefficiente de rugosidade	0,4

Fonte: autor.

O coeficiente de rugosidade utilizado foi 0,4, sendo que esse coeficiente é referente a áreas residenciais onde há muitas interferências no fluxo de massa se ar. Abaixo consta o cálculo de correção de velocidade.

$$V = 5,71 \cdot \left(\frac{45}{10}\right)^{0,4} = 10,42 \text{ m/s}$$

Sabendo da média de velocidade na altura de instalação, já é possível ter noção do aproveitamento do aerogerador, pois sua velocidade de partida é de 2,2 m/s, o que é significativamente abaixo da velocidade média.

Para o cálculo da potência disponível na área de conversão, utilizou-se a equação 2.4, porém ainda é necessário saber qual a massa específica do ar na região e calcular a área de conversão que é dada pela equação 2.5.

$$\begin{aligned}
 A &= \pi \cdot r^2 \\
 A &= \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \\
 A &= \pi \cdot \left(\frac{2,46}{2}\right)^2 = 4,75 \text{ m}^2
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Segundo [1], que leva em consideração a altitude e temperatura para a determinação da massa específica, e esta a uma altitude de 0 metros, que é no nível do mar e a uma temperatura de 25°C é igual a  $1,185 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ .

Aplicando as incógnitas na equação (2.4), têm-se:

$$P_d = \frac{1}{2} 1,185 \cdot 4,75 \cdot 10,42^3 = 3184 \text{ W}$$

A potência disponível pelo vento em uma área de  $4,75 \text{ m}^2$  é de aproximadamente 3184 W, contudo, sabe-se que o aerogerador só consegue fornecer uma máxima potencia de 1000 W, assim, é possível saber qual a máxima eficiência na conversão de energia que pode ser calculada a partir da equação 2.6.

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{P_o}{P_d} \cdot 100\% \\
 \eta &= \frac{1000}{3184} \cdot 100\% = 31,4\%
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Com isso, no momento em que a velocidade do vento estiver a 12 m/s, o sistema estará processando 31,4% da potência disponível pelo vento.

Para saber qual a frequência de geração elétrica desse gerador, utiliza-se a equação a seguir que exposta em [2].

$$fg = \frac{fe \cdot 120}{p} \quad (2.8)$$

$$fe = \frac{700 \cdot 14}{120}$$

$$fe = 81,67 \text{ Hz}$$

O valor eficaz da tensão de entrada é dado pela fórmula a seguir:

$$V_{efi} = \frac{V_f}{\sqrt{2}} = V_f \cdot 0,707 \quad (2.9)$$

## 2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A equação para aplicação na correção de velocidade do vento a uma altura H 2.1, e a equação para a estimativa do potencial eólico 2.4, são as equações gerais para o dimensionamento de um aerogerador levando em consideração apenas a velocidade do vento e a área das pás, tais equações foram apresentadas neste capítulo, assim como um breve histórico da evolução da turbina eólica até sua aplicação da geração de eletricidade.

Por motivo da grande variação da velocidade das massas de ar, o gerador síncrono de ímã permanente apresenta maior viabilidade, o que leva a utilização dessa topologia neste estudo, além de suas características de controle já apresentadas no decorrer do texto.

Como já exposto, a energia eólica teve grande evolução ao passar dos anos até os dias atuais, momento em que a mesma já é utilizada como uma das principais fontes de energia elétrica do Brasil e do mundo, com isso, percebe-se que é tendencioso para o futuro próximo que sejam criados mais incentivos para a implementação da autoprodução de energia, sempre buscando mais investimentos para o setor e assim caminhamos rumo ao desenvolvimento sustentável.

## CAPÍTULO 3 - SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE ENERGIA

### 3.1 INTRODUÇÃO

O sistema utilizado neste trabalho tem a finalidade de processar a energia gerada pela fonte eólica de pequeno porte e fornecer a carga, que é interligada com a rede elétrica, uma energia com parâmetros de qualidade semelhantes ao da concessionária.

Para o melhor aproveitamento do recurso eólico em todas as faixas de velocidade do vento, é necessário a conexão de um retificador trifásico, já que o gerador fornece 3 fases com tensão em corrente alternada (CA), com isso essa tensão será convertida para tensão em corrente contínua (CC).

Para processar a energia proveniente do retificador, acopla-se um conversor Boost em sua saída, assim a tensão gerada em um nível mais baixo será convertida para um nível mais elevado. É no conversor boost que será implementado a técnica do rastreamento do ponto de máxima potência, assim o sistema poderá aproveitar mais eficientemente o potencial eólico disponível.

Uma vez que esse estudo é focado no fornecimento de energia para um ponto de consumo, a tensão deve ser fornecida em corrente alternada, com isso se faz necessário a utilização de um inversor que transforma o sinal CC da saída do conversor Boost em CA.

Sabendo da fundamental importância que esses circuitos (retificador, conversor CC-CC e inversor) exercem no processamento de energia da conversão eólio-elétrica, este capítulo foi destinado ao estudo de tais circuitos.

### 3.2 RETIFICADORES

Os retificadores são circuitos eletrônicos responsáveis por converter um sinal CA em um sinal CC. Para converter a tensão, o retificador faz uso de componentes semicondutores de eletrônica de potência, que são arranjados de maneira que a tensão obtida na saída seja em corrente contínua [16].

Existem duas maneiras de operar os conversores de tensão, quando a retificação é denominada controlada, são utilizados retificadores controlados que operam em regime de chaveamento, em geral os SLRs (*silicon controlled rectifier*) ou componentes da família dos tiristores. A segunda maneira é a retificação não controlada, quando são utilizados diodos semicondutores para fazer a conversão da energia elétrica, com isso não existe nenhuma possibilidade de fazer ajustes ou controles durante o processo de conversão [17].

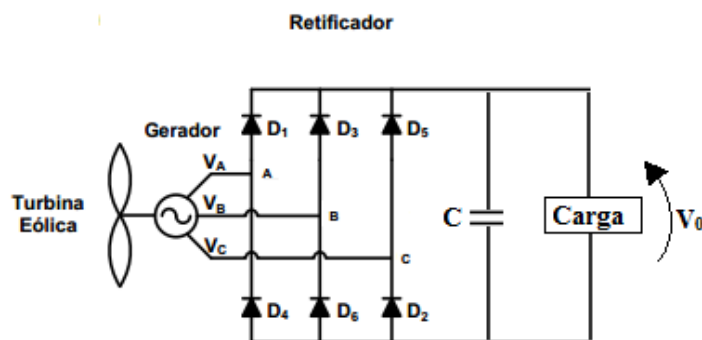
Neste trabalho será aplicado um retificador trifásico de ponte completa, sendo este não controlado, mais conhecido como retificador trifásico tipo ponte de GREATZ.

### 3.2.1 Retificador Trifásico (Ponte de Greatz)

A utilização de retificadores trifásicos se faz necessária quando se processa níveis elevados de potência, com isso o equilíbrio da potência entre as fases é garantido [17].

Este retificador faz uso de 6 diodos, sendo dois diodos por fase de alimentação que são provenientes do gerador síncrono trifásico, assim a conversão de tensão CA para CC acontece nas fases singularmente. Um diodo permite que a corrente vá da fonte de alimentação até a carga e outro permite o retorno da corrente da carga para a fonte de alimentação, desta forma não é necessário um ponto de neutro (N). A figura 8 faz a representação da topologia deste retificador [18], [19], [6].

Figura 8 – Retificador trifásico não controlado do tipo ponte de GREATZ.

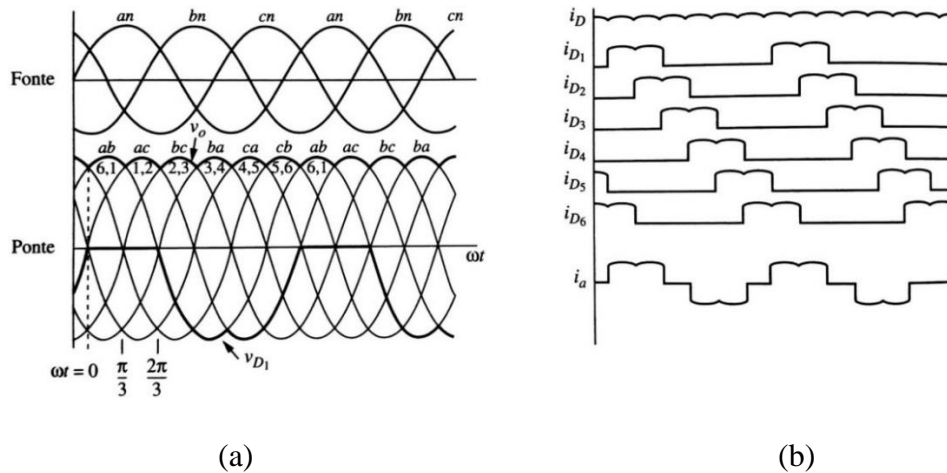


Fonte: [6] modificada.

Seguindo a lei da tensão de Kirchhoff, é observado que na metade superior da ponte retificadora, apenas um diodo poderá conduzir por vez, assim o diodo condutor será aquele em que tiver seu anodo conectado à fase de maior nível de tensão no instante. Da mesma forma é observado para a metade inferior, porém o diodo condutor será o que tiver seu catodo conectado a fase de menor nível de tensão no instante. Por consequência do exposto,  $D_1$  e  $D_4$ , não poderão conduzir ao mesmo instante, assim como  $D_3$  e  $D_6$ ,  $D_5$  e  $D_2$ . Com isso, 6 combinações de fase na saída são identificadas para esse retificador,  $V_{AB}$ ,  $V_{AC}$ ,  $V_{BA}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$ ,  $V_{CB}$ . Assim, por conta dos seis pulsos na saída, este retificador é chamado de *retificador de seis pulsos*, que se for considerado o período de  $360^\circ$ , uma transição de maior valor da tensão de linha deve acontecer a cada  $360/6$ , impactando na frequência da tensão de saída que resultará em uma tensão com frequência de  $6w$ , sendo que  $w$  é a frequência do gerador trifásico [18].

Na figura 9a, pode-se observar as tensões das fases e as combinações das tensões de linha balanceadas. Na figura 9b é mostrada a corrente em cada diodo da ponte.

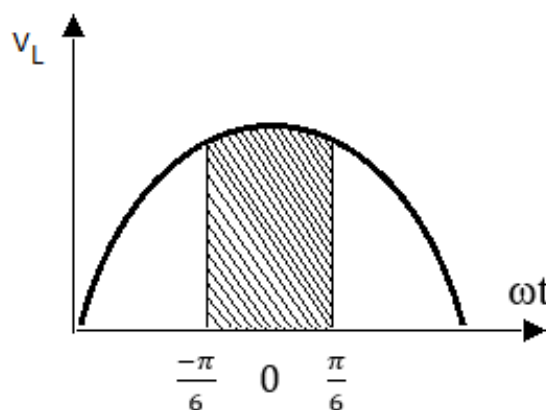
Figura 9 – (a) Tensões das fases e sua respectiva resultante. (b) Corrente em cada diodo da ponte.



Fonte: [18] Modificada.

A tensão média na saída do retificador é obtida a partir da razão entre a área sob a curva definida por  $1/6$  do período ( $\frac{\pi}{3}$ ) por seu próprio período ( $\text{Área}/T$ ). Considerando a forma de onda na carga como sendo um cosseno, posiciona-se o eixo da ordenada onde a função apresenta seu valor máximo, em  $\theta = \omega t = 0$ , nesse momento o valor do cosseno é máximo, igualando-se com a unidade e o período de integração é definido em  $1/12$  de período antes do 0 até  $1/12$  do período após 0, ou seja, de  $-\frac{\pi}{6}$  até  $\frac{\pi}{6}$ . A figura 10 representa  $1/6$  do período para o cálculo da tensão na carga [17].

Figura 10 – Representação de  $1/6$  de período, tendo como referência o eixo das ordenadas para determinação da tensão média na carga.



Fonte: autor baseado em [17].



Para a determinação da tensão média na carga, é necessário seguir as etapas seguintes. Sabe-se que o valor da tensão de linha é obtido a partir de uma relação entre a tensão de fase-neutro e  $\sqrt{3}$ , em que a expressão 3.1 traz essa relação.

$$V_L = \sqrt{3} V_f \quad (3.1)$$

$$V_{Cméd} = \frac{1}{T} \cdot \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_L \cdot \cos(\omega t) d(\omega t) \quad (3.2)$$

Substituindo 3.1 em 3.2 e sabendo que o período  $T$  é igual  $\frac{\pi}{3}$ , consegue-se obter a tensão média na carga ( $V_{Cméd}$ ) e sua equação é expressa por 3.3.

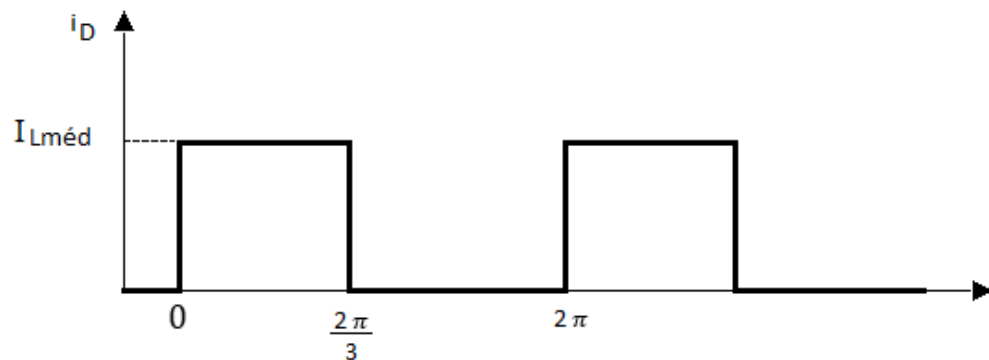
$$V_{Cméd} = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \cdot \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_L \cdot \cos(\omega t) d(\omega t) \quad (3.3)$$

Resolvendo a integral da equação 3.3 obtém-se a equação 3.4.

$$V_{Cméd} = 0,9549 \cdot V_L \quad (3.4)$$

Para o cálculo da corrente média no diodo, considera-se para o intervalo de integração seu período de condução, o mesmo está representado na figura 11.

Figura 11 – Forma de onda da corrente em um dos diodos da ponte retificadora.



Fonte: autor.

A corrente média no diodo é dada pela solução da equação 3.5.

$$I_{Dméd} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{2\pi}{3}} I_{Cméd} d(\omega t) \quad (3.5)$$

Resolvendo a integral da equação 3.5, obtém-se a corrente média de cada diodo da ponte de retificação, portanto:

$$I_{Dméd} = \frac{I_{Cméd}}{3} \quad (3.6)$$

A corrente média no diodo também pode ser obtida seguindo 3.7.

$$I_{Dméd} = \frac{P_i}{3 \cdot V_{Cméd}} \quad (3.7)$$

Seguindo a expressão 3.8, pode-se obter a corrente média na saída do retificador.

$$I_{Cméd} = \frac{P_i}{V_{Cméd}} \quad (3.8)$$

Já a corrente eficaz é dada após a resolução da equação 3.9.

$$I_{Defi} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\frac{2\pi}{3}} (I_{Cméd})^2 d(\omega t)} \quad (3.9)$$

Resolvendo a equação 3.9, tem-se:

$$I_{Defi} = \frac{I_{Cméd}}{\sqrt{3}} \quad (3.10)$$

Sabe-se que corrente máxima através do diodo ocorre quando a ondulação de tensão é mínima, com isso:

$$I_{Dmáx} = \frac{P_i}{V_{Cmin}} \quad (3.11)$$

Como expresso em [17], a tensão máxima reversa nos diodos da ponte, é dada pela tensão máxima de linha:

$$V_{DP} = \sqrt{3} \cdot V_f \quad (3.12)$$

Para calcular o filtro capacitivo da saída do retificador, é necessário calcular os valores máximos e mínimos da tensão de saída, que é especificada de acordo com o nível de ondulação que se deseja, com isso, tem-se:

$$V_{Cmax} = V_{Cméd} + \frac{\Delta V_C}{2} \quad (3.13)$$

$$V_{Cmin} = V_{Cméd} - \frac{\Delta V_C}{2} \quad (3.14)$$

Após o cálculo das tensões máxima e mínima, utiliza-se a equação 3.15 para determinação do valor do filtro capacitivo.

$$C_I = \frac{P_i}{6 f_g \cdot (V_{Cmáx}^2 - V_{Cmin}^2)} \quad (3.15)$$

### 3.2.1.1 Modelagem do Retificador

O gerador entrega uma tensão de fase eficaz na ordem de 75V ao retificador, com isso, utilizando a equação 3.1, consegue-se obter a tensão de linha de operação na entrada do retificador.

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_f = 130 V$$

Logo, a tensão de saída no barramento CC do retificador é calculada seguindo a expressão 3.4, assim:

$$V_{Cméd} = 0,955 \cdot V_L = 124,15 \text{ V}$$

A tabela 3 apresenta as especificações para o projeto do retificador.

Tabela 3 – Especificações para o projeto do retificador.

<b>Especificações do Projeto do Retificador</b>	
<b>Faixa de Operação da Tensão de Entrada (rms)</b>	0 - 75V
<b>Tensão de Saída</b>	124,15 V
<b>Potência de Entrada</b>	1000 W
<b>Ondulação da Tensão de Saída (<math>\Delta V_i</math>)</b>	5% de $V_C$

Fonte: autor.

Munido da equação 3.7 consegue-se calcular a corrente média no diodo.

$$I_{Dméd} = \frac{1000 \text{ W}}{3 \cdot 124,15 \text{ V}} = 2,68 \text{ A}$$

Para o cálculo da corrente eficaz, utiliza-se a equação 3.10, em que  $I_{Lméd} = I_{Cméd}$ .

$$I_{Defi} = \frac{I_{Cméd}}{\sqrt{3}} = \frac{P_i}{\sqrt{3} \cdot V_{Cméd}} = 4,44 \text{ A}$$

Calcula-se a corrente máxima através do diodo, utilizando a equação 3.11, com isso:

$$I_{Dmáx} = \frac{P_i}{V_{Cmín}} = \frac{1000 \text{ W}}{121 \text{ V}} = 8,26 \text{ A}$$

A corrente fornecida à carga é calculada após a resolução de 3.12:

$$I_{Cméd} = \frac{P_i}{V_{Cméd}} = \frac{1000 \text{ W}}{124,15 \text{ V}} = 8,05 \text{ A}$$

Como expresso em [18], com a inserção de um capacitor de filtro implica uma corrente de pico adicional, que é calculada seguindo a equação 3.16.

$$I_{CI} = 2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot C_1 \cdot \sqrt{V_{Cmáx}^2 - V_{Cmín}^2} = 26,13 \text{ A} \quad (3.16)$$

Com tudo, a corrente de pico nos diodos é a soma entre a corrente máxima e a corrente adicional por consequência do capacitor, com isso:

$$I_{Pico} = I_{Dmáx} + I_{CI} = 34,4 \text{ A}$$

Calculando a tensão de pico reversa no diodo através da equação 3.13, tem-se:

$$V_{DP} = 130 \text{ V}$$

Foram utilizadas as equações 3.13 e 3.14 para a determinação das tensões máximas e mínimas a serem utilizadas no cálculo da capacitância de filtro do retificador, que é calculada pela equação 3.15.

$$C_1 = \frac{P_i}{6 f_g \cdot (V_{Cmáx}^2 - V_{Cmín}^2)} = \frac{1000 \text{ W}}{6 \times 81 \cdot (127,25^2 - 121,04^2)} = 1334 \text{ } \mu\text{F}$$

### 3.2.1.1.1 Projeto do Retificador

De acordo com os parâmetros calculados no decorrer do item 3.2.1.1, foi possível obter os dados necessários para o dimensionamento dos diodos e do capacitor que compõem o retificador. Na tabela 4, estão expostos todos os esforços dos diodos do retificador.

Tabela 4 – Esforços dos Diodos do Retificador.

<b>Diodos D1 a D6</b>	
<b>Máxima Tensão Reversa</b>	130 V
<b>Máxima Corrente</b>	8,26 A
<b>Corrente Média</b>	2,68 A
<b>Corrente Adicional</b>	26,13 A
<b>Corrente de Pico</b>	34,4 A

Fonte: autor.

Na tabela 45, encontram-se as especificações do diodo retificador escolhido.

Tabela 5 – Especificações do diodo retificador.

<b>Tipo de Diodo</b>	
<b>Referência (DIODES Incorporated)</b>	10A05
<b>Máxima Tensão Reversa</b>	420 V
<b>Corrente Média Máxima</b>	10 A @ 50°C
<b>Máxima Corrente de Pico não Repetitiva</b>	600 A
<b>Faixa de Operação para Temperatura de Junção</b>	- 65 até 150°C

Fonte: datasheet.

A corrente eficaz máxima que passa através do capacitor, exerce fundamental importância para a escolha comercial do mesmo, com isso, ela é dada por 3.17 que é a corrente eficaz na saída do retificador.

$$I_{Cefi} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{Cmed} = 6,57 \text{ A} \quad (3.17)$$

Os parâmetros calculados do retificador encontram-se na tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros do Capacitor.

<b>Capacitor</b>	
<b>Tensão Máxima</b>	127,25 V
<b>Tensão Mínima</b>	121,04 V
<b>Capacitância</b>	1,324 mF
<b>Corrente no Capacitor</b>	6,57 A

Fonte: autor.

Tomando como referência o catálogo da *TDK Epcos Snap-In Capacitores* (B43545), foi possível tomar como referência o capacitor que será implementado ao retificador. Como a capacitância deste capacitor da *TDK* é menor do que a que o projeto necessita, então utiliza-se 3 capacitores arranjados em paralelo, adicionado de um capacitor de polipropileno para que correntes mais elevadas sejam filtradas e não cause nenhum dano ao projeto [6].

Na tabela 7, apresenta as características do capacitor utilizado.

Tabela 7 – Especificações do Capacitor Eletrolítico.

<b>Capacitor (ELETROLÍTICO)</b>	
<b>Referência (TDK)</b>	B43545
<b>Capacitância</b>	820 $\mu$ F
<b>Corrente Eficaz</b>	8.99 A @60°C
<b>Tensão Máxima</b>	400 V
<b>Resistência em Série do Capacitor</b>	26 m $\Omega$

Fonte: datasheet.

Na tabela 8 constam especificações do Capacitor de Polipropileno.

Tabela 8 – Especificações do Capacitor de Polipropileno.

<b>Capacitor (ELETROLÍTICO)</b>	
<b>Referência (TDK)</b>	B32694
<b>Capacitância</b>	220 $\mu$ F
<b>Tensão Máxima</b>	630 V

Fonte: datasheet.

### 1.2 3.3 CONVERSOR CC-CC

Esse conversor é utilizado, pois a fonte de tensão disponível é proveniente de um retificador, em paralelo a isso, a carga necessita de controle linear na tensão de alimentação.

A fonte na entrada do sistema fornece energia para o conversor CC-CC que, conseqüentemente fornece energia à carga. Segundo [23], o conversor CC-CC pode ser conceituado como um sistema formado por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores, além dos semicondutores de potência que operam como interruptores. Os elementos passivos são responsáveis por controlar o fluxo de energia elétrica da fonte de entrada para a saída, ou seja, a carga. A variável de controle ou, variável de entrada do sistema, representada por  $D$ , é conhecida como razão-cíclica ou ciclo de trabalho.

Em resumo, os conversores CC-CC são responsáveis por receberem um determinado nível de tensão em corrente contínua em seus terminais de entrada e o converte em outro nível de tensão ou corrente contínua, isso de acordo com o tipo de conversor utilizado. São

vários os tipos de conversores, sendo os mais populares e difundidos: Buck, Boost, Cúk, Buck-Boost, Sepic, Zeta e outras variações destes [18].

### 3.3.1 Conversor Boost

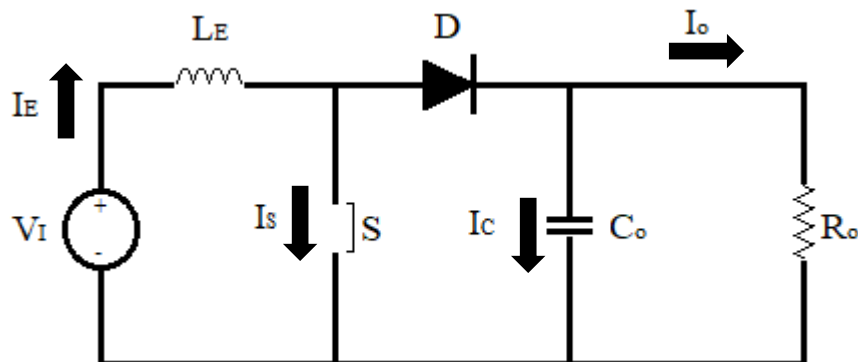
Este será o conversor utilizado neste trabalho, sendo ele um dos conversores chaveados que funcionam pela comutação periódica de uma chave eletrônica, ou seja, abertura e fechamento de acordo com o tempo.

O conversor Boost, também conhecido por conversor elevador, converte o nível de tensão fornecido por uma fonte e entrega uma tensão em um nível maior, ou seja, os níveis médios na saída são maiores que os da entrada, por isso é denominado elevador.

#### 3.3.1.1 Topologia e Princípio de Funcionamento

O conversor Boost é constituído por um indutor  $L_E$ , um diodo  $D$ , uma chave comutativa  $S$  e um capacitor  $C_o$ . Esses componentes são organizados como disposto na figura 12 e tem como entrada a fonte geradora de energia  $V_i$ , e como saída uma resistência  $R_o$ , que é própria carga.

Figura 12 – Topologia do Conversor Boost.



Fonte: autor.

Considerando que este conversor opera em condições ideais, não havendo perdas, o mesmo tem sua operação dividida em duas etapas. Etapa 1, quando a chave se encontra em condução, e etapa 2, quando a chave se encontra aberta. Para analisar o funcionamento do conversor, primeiro será analisado a etapa 1, chave fechada.

##### 3.3.1.1.1 Primeira Etapa de Operação – Chave Fechada

Quando a chave se encontra fechada, ou seja, ela está em modo de condução, se comporta como um curto-circuito, fazendo com que a corrente não prossiga através diodo,

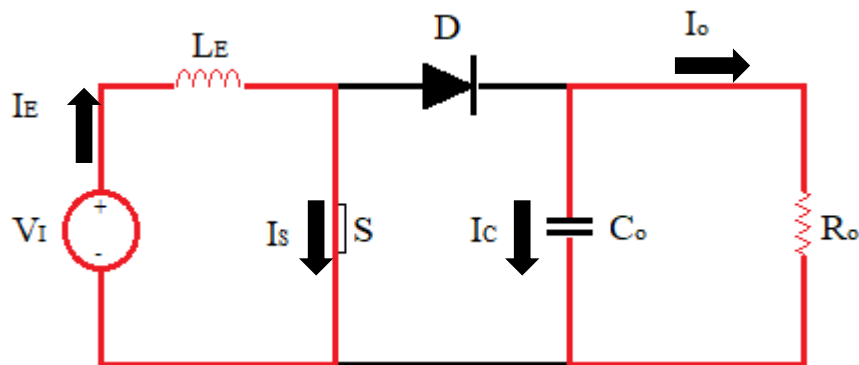
com isso, a corrente na chave é igual a corrente no indutor e aumenta de maneira linear. Como não há corrente no diodo, o comportamento dele é comparado a um circuito aberto, isolando o estágio de saída, assim, a carga é alimentada pelo capacitor que durante essa operação se descarrega.

Analisando o circuito da figura 13, percebe-se que a tensão no indutor é igual à tensão na fonte (entrada), assim, aplicando a lei de Kirchhoff das tensões, pode-se obter as seguintes expressões:

$$\begin{aligned} V_i &= V_{LE} \\ V_L &= V_i = L \frac{di_L}{dt} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$\frac{di_L}{dt}$  = Taxa de variação da corrente no indutor;

Figura 13 – Primeira Etapa de Operação.



Fonte: autor.

Por motivo da taxa de variação da corrente ser uma constante, esta aumenta de maneira linear com o passar do tempo quando a chave permanece fechada, desse modo, a variação na corrente do indutor que antes era dada por uma derivada, agora é dada por:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_i}{L} \quad (3.19)$$

Como esta operação se dá por conta do período de tempo em que a chave permanece fechada, a variação do tempo utilizada em 3.18 é dada pela razão tempo de abertura da chave pelo período, que é obtido por:

$$\begin{aligned} \frac{T_{on}}{T} &= D \\ T_{on} &= D \cdot T \end{aligned} \quad (3.20)$$

A razão cíclica também pode ser obtida utilizando a razão entre as tensões de saída e entrada.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} \quad (3.21)$$

Dessa forma, resolvendo a equação 3.19, pode-se obter a variação da corrente (ripple de corrente) para o tempo em que a chave se encontra fechada, como é exposto na equação 3.22.

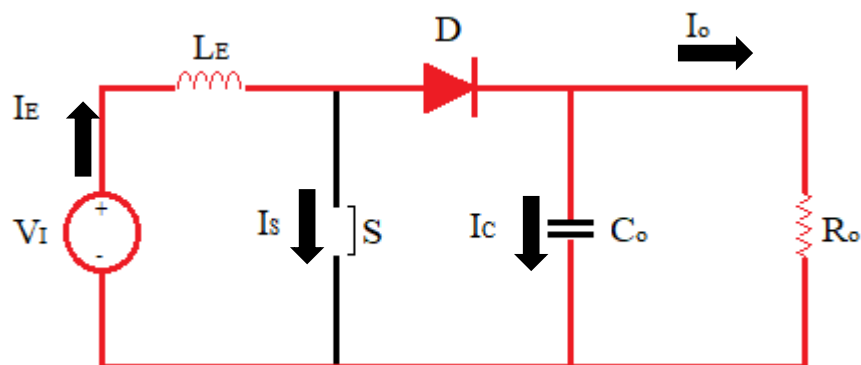
$$\Delta i_L = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} \quad (3.22)$$

### 3.3.1.1.2 Segunda Etapa de Operação – Chave Aberta

Quando a chave se encontra aberta, como visto na figura 14, o segmento que operava como um curto-circuito na etapa anterior, nesta etapa age com um circuito aberto, o qual não permite a passagem da corrente e, em consequência, a corrente no indutor não pode mudar instantaneamente. Contudo, o diodo que antes era polarizado inversamente, fica polarizado diretamente, fornecendo um caminho para corrente proveniente do indutor. Para o dimensionamento, assume-se que a tensão na saída ( $V_o$ ) do conversor seja constante, com isso, aplicando Kirchhoff das tensões, a tensão no indutor é dada por:

$$\begin{aligned} V_o &= V_L + V_I \\ V_L &= V_o - V_i = L \frac{di_L}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} &= \frac{V_o - V_i}{L} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Figura 14 – Segunda etapa de operação – Chave aberta.



Fonte: autor.

Sabendo que a taxa de variação na corrente do indutor é uma constante, em que há a alteração da corrente de maneira linear enquanto a chave está aberta, o cálculo para a variação dessa corrente se dá por conta das equações a seguir:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_o - V_i}{L} \quad (3.24)$$



O período em questão para o cálculo é o período de tempo em que a chave se encontra aberta, a qual a variação do tempo em consideração é dada pela equação 3.25.

$$T_{off} = T - T_{on} \quad (3.25)$$

$$T_{on} = D \cdot T \quad (3.26)$$

Substituindo 3.26 em 3.25:

$$T_{off} = T - D \cdot T = (1 - D) \cdot T \quad (3.27)$$

Com tudo, resolvendo 3.28 para o ripple de corrente no momento em que a chave se encontra aberta, obtêm-se ( $\Delta i_L$ ):

$$\Delta i_L = \frac{(V_o - V_L)(1-D) \cdot T}{L} \quad (3.28)$$

O conceito de conversor elevador é provado por (20), que quando se tem o conversor operando em estado estável, não há variação na corrente, com isso, a tensão na saída é fornecida de acordo com razão cíclica que, se esta for 0, a tensão de saída será igual a de entrada e, quanto maior for esta razão menor será o denominador o que resulta em uma tensão de saída maior que a de entrada, sendo dada por:

$$V_o = \frac{V_i}{1-D} \quad (3.29)$$

Os valores máximos e mínimos da corrente no indutor são determinados em 3.30 e em 3.31:

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (3.30)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (3.31)$$

O valor da indutância no conversor Boost é obtida com a resolução da equação 3.32, contudo, substitui-se o período presente nesta equação pela a frequência, em que a relação entre período e frequência é dada pela expressão 3.33.

$$L_E = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{\Delta i_L} \quad (3.32)$$

$$T = \frac{1}{f_s} \quad (3.33)$$

$$L_E = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{\Delta i_L} = \frac{V_i \cdot D}{\Delta i_L \cdot f_s} \quad (3.34)$$

Para o cálculo do filtro capacitivo na saída do conversor, é necessário levar em consideração a corrente que por ele irá passar, com isso:

$$I_C = C_o \cdot \frac{dV_C}{dT} \quad (3.35)$$

Sabendo que a taxa de variação na corrente do capacitor é uma constante, e as alterações da corrente acontecem de maneira linear, o cálculo para a variação dessa corrente se dá por conta das seguintes equações:

$$I_C = I_o \quad (3.36)$$

$$I_o = C_o \cdot \frac{\Delta V_C}{\Delta t} \quad (3.37)$$

$$C_o = \frac{I_o \cdot \Delta T}{\Delta V_C} \quad (3.38)$$

Assim como no indutor, o período para o cálculo é o tempo em que a chave se encontra aberta, a qual a variação do tempo em consideração é dada pela equação 3.26, com isso:

$$\Delta t = T_{on} = D \cdot T \quad (3.39)$$

$$C_o = \frac{I_o \cdot D \cdot T}{\Delta V_C} \quad (3.40)$$

O período é dado pela equação 3.33, portanto a capacitância do conversor boost é dada de acordo com as equações que levam em consideração a corrente e ou a tensão, que são apresentadas, respectivamente, em 3.41 e 3.42.

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_C} \quad (3.41)$$

$$C = \frac{D}{R \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot f_s} \quad (3.42)$$

Por último, calcula-se a resistência que emula a carga conectada na saída do conversor Boost. Essa resistência é dada seguindo a expressão 3.43.

$$R_C = \frac{V_o^2}{P} \quad (3.43)$$

### 3.3.1.2 Modelagem do Conversor Boost

Sabendo que o conversor boost é alimentado pela energia proveniente do retificador, então sabe-se que a tensão de entrada deste é a tensão de saída do retificador, ou seja, 124,15V. O conversor Boost deve fornecer uma tensão de 400 V em sua saída, para que assim o inversor possa fornecer a carga uma tensão de 220 V. Na tabela 9 constam os dados a serem utilizados para a modelagem deste conversor.

Tabela 9 – Especificações dos dados para a modelagem do conversor boost.

<b>Especificações do Projeto do Conversor</b>	
<b>Tensão de Entrada</b>	124,15 V
<b>Tensão Média de Saída</b>	400 V
<b>Potência</b>	1000 W

Fonte: autor.

Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros para o projeto do conversor boost.

Tabela 10 – Parâmetros de projeto para a modelagem do conversor boost.

Parâmetros de Projeto do Conversor	
Frequência de Chaveamento	20 kHz
Ondulação (Ripple) de Tensão	5%
Ondulação (Ripple) de Corrente	5%

Fonte: autor.

Utilizando a equação 3.21 foi determinado a razão cíclica do conversor boost, que resultou em:

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = 0,689$$

Para calcular a indutância, é necessário primeiro calcular o ripple da corrente da entrada do conversor, o mesmo é calculado a partir das especificações que se deseja, no caso, 5%, com isso tem-se:

$$I_{in} = \frac{P_i}{V_i} = \frac{1000W}{124,15V} = 8,05A$$

$$\Delta i_L = I_{in} \cdot 5\% = 0,40$$

Após o cálculo do *ripple* de corrente, calcula-se a ondulação máxima e mínima da corrente de entrada, que é calculada somando e subtraindo respectivamente,  $\frac{1}{2}$  ripple a corrente de entrada, como exposto na expressão 3.44 e 3.45.

$$\Delta i_{Lmax} = I_{in} + \frac{\Delta i_L}{2} = 8,05A + 0,20125A = 8,25A \quad (3.44)$$

$$\Delta i_{Lmin} = I_{in} - \frac{\Delta i_L}{2} = 8,05A - 0,20125A = 7,84A \quad (3.45)$$

Seguindo a equação 3.34, encontra-se o valor da indutância do conversor.

$$L = \frac{V_i \cdot D}{\Delta i_{Lf}} = \frac{124,15 \cdot 0,689}{0,4025 \cdot 20000} = 10,6 \text{ mH}$$

Para o cálculo da capacitância, é necessário calcular a ondulação da tensão na saída do conversor e a resistência da carga que é dada por 3.43. O percentual da ondulação e a frequência são especificados na tabela 9.

$$\Delta V = V_s \cdot 5\% = 400 \cdot 5\% = 20V$$

$$R = \frac{V_o^2}{P} = \frac{400V^2}{1000W} = 160 \Omega$$

Utilizando a expressão 3.43, calcula-se o filtro capacitivo do conversor boost.

$$C = \frac{D}{R \cdot \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \cdot f} = \frac{0,689}{160 \cdot \left(\frac{20}{400}\right) \cdot 20000} = 4,30 \mu F$$

A resistência em série do capacitor é calculada seguindo 3.46.

$$R_{se\_m\acute{a}x} = \frac{\Delta V}{\Delta i L_{m\acute{a}x}} = \frac{20 V}{8,25 A} = 2,42 \Omega \quad (3.46)$$

A seguir é apresentado na tabela 11, os parâmetros que foram calculados para o conversor boost.

Tabela 11 – Resultados dos cálculos dos parâmetros do conversor.

Resultados dos Parâmetros do Conversor	
Razão Cíclica (D)	0,689
Indutância (L)	10,6 mH
Ondulação de Corrente Máxima ( $\Delta I_L$ )	0,40 A
Capacitância (C)	4,30 $\mu F$
Resistência (R)	160 $\Omega$
Resistência em Série do Capacitor (RSE)	2,42 $\Omega$
Corrente de Saída (C)	2,49 A

Fonte: autor.

### 3.3.1.2.1 Projeto do Conversor Boost

Tomando como referência o catálogo da *TDK Epcos Snap-In Capacitors* (B43544), foi possível escolher um capacitor comercial para utilizar neste projeto. O capacitor escolhido para atender essa demanda é apresentado na tabela 12.

Tabela 12 – Especificações do Capacitor do Conversor.

Capacitor (ELETROLÍTICO)	
Referência (TDK)	B43544
Capacitância (F)	270 $\mu F$
Corrente Eficaz (A)	4,73 A @60°C
Tensão Máxima (V)	550 V
Resistência em Série do Capacitor ( $\Omega$ )	430 m $\Omega$

Fonte: datasheet.

A escolha dos capacitores normalmente se dá com relação a sua resistência e a capacitância mínima para o projeto, sabendo disso, foram arranjados 5 capacitores em paralelo, com isso foi obtido uma capacitância e resistência equivalente, as quais são apresentadas a seguir.

$$C_{eqv} = 5 \cdot 270 \mu F = 1,350 mF$$

$$R_{eqv} = \frac{430 m\Omega}{5} = 86 m\Omega$$

Para a escolha do interruptor do conversor, foi tomado como referência o catálogo da ST Microelectronics e suas características são apresentadas na tabela 13.

Tabela 13 – Especificações do Interruptor do Conversor.

<b>Interruptor</b>	
<b>Referência (ST Microelectronics)</b>	STY60NM60
<b>Tensão de Dreno – Source (<math>V_{DS}</math>)</b>	600 V
<b>Tensão Dreno – Gate (<math>V_{DGR}</math>)</b>	600 V
<b>Tensão Gate – Source (<math>V_{GS}</math>)</b>	$\pm 30$
<b>Máxima Corrente de Dreno (Média) (<math>I_D</math>)</b>	60 A @ 25°C
<b>Máxima Corrente de Dreno – Pulsada (<math>I_{DP}</math>)</b>	240 A
<b>Resistência Térmica Junção – Dissipador (<math>R_{SD}</math>)</b>	0,22 °C/W
<b>Resistência Térmica Junção – Ambiente (<math>R_{SJA}</math>)</b>	30 °C/W
<b>Resistência de Condução (<math>R_{DS}</math>)</b>	55 mΩ
<b>Capacitância de Entrada (<math>C_{ISS}</math>)</b>	7000 pF
<b>Faixa de Operação Para Temperatura de Junção (<math>T_{SJ}</math>)</b>	300°C
<b>Tempo de Subida (<math>t_r</math>)</b>	95 ns
<b>Tempo de Subida (<math>t_f</math>)</b>	76 ns

Fonte: datasheet.

Da mesma forma como no retificador, foi tomado como referência o datasheet da *DIODES Incorporated*. As características do diodo do Boost encontram-se na tabela 14.

Tabela 14 – Especificações do Diodo do Conversor.

<b>Tipo de Diodo</b>	
<b>Referência (DIODES Incorporated)</b>	10A05
<b>Máxima Tensão Reversa</b>	420 V
<b>Corrente Média Máxima</b>	10 A @ 50°C
<b>Máxima Corrente de Pico não Repetitiva</b>	600 A
<b>Faixa de Operação para Temperatura de Junção</b>	- 65 até 150°C

Fonte: datasheet.

### 3.4 INVERSOR

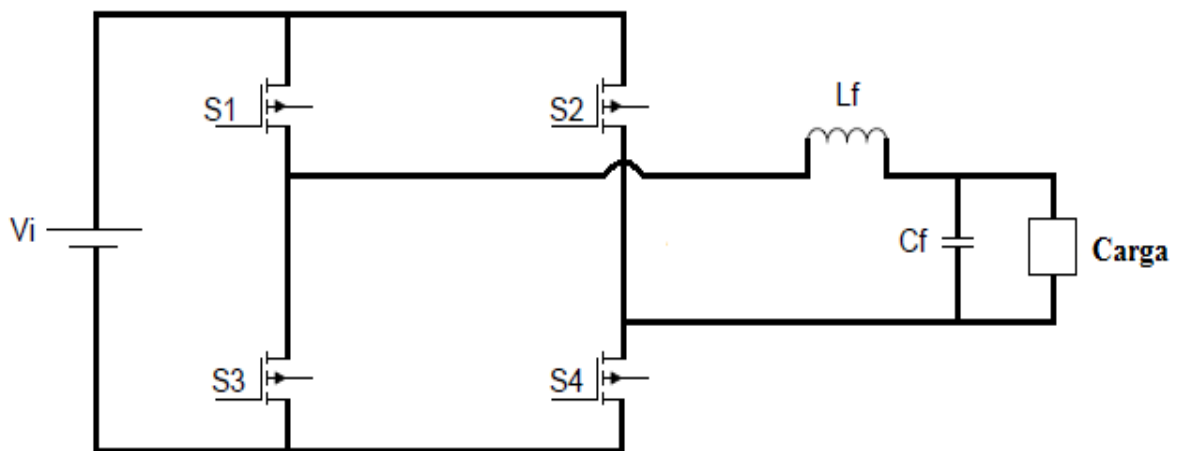
Os conversores CC-CA ou inversores são circuitos responsáveis por converter uma tensão em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), com amplitude simétrica para os trifásicos, valor médio nulo e frequência fixa ou variável, transferindo potência de uma fonte CC para uma carga CA [18]. O princípio de funcionamento dos inversores é contrário ao dos retificadores.

A conversão da tensão se dá por meio da abertura e fechamento de chaves e, a partir da modelagem do circuito, a tensão na carga se comporta de maneira alternada.

A operação dos inversores pode acontecer em vários níveis sendo que ao incrementar níveis ao inversor, o problema com a onda quadrada será minimizado por conta dos degraus provenientes das chaves, formadoras dos ramos que recebem as fases provenientes do gerador. A abertura e fechamento das chaves são controladas de maneira que haja sincronismo e a tensão de saída seja alternada e seu sinal obtido em formato mais aproximado ao de uma onda puramente senoidal, com isso a filtragem dos harmônicos será facilitada [19].

Na aplicação do inversor nesse estudo, é utilizado um inversor PWM senoidal monofásico que terá como entrada a tensão fornecida pelo conversor boost. Assim, a topologia irá inverter para que seja obtida na saída, que é conectada a carga, uma tensão em corrente alternada. A figura 15 traz a topologia no inversor utilizada no trabalho.

Figura 15 – Inversor monofásico utilizado no trabalho.



Fonte: autor.

### 3.4.1 Inversor PWM Senoidal

A utilização da modulação por largura de pulso (PWM) proporciona a diminuição da distorção proveniente das harmônicas totais da corrente na carga, além de poder adequar essas distorções de maneira mais fácil do que em uma estrutura com chaveamento em onda quadrada. Nesse tipo de inversor as harmônicas são melhores controladas devido às distorções serem em frequências mais elevadas, facilitando a filtragem. O controle das harmônicas acontece por meio da conexão de filtros na saída do inversor [18].

Apresentam-se também como vantagens do PWM a possibilidade de controlar a amplitude da tensão de saída e a redução dos requisitos de filtro para a diminuição das distorções harmônicas, porém, se faz necessário a utilização de circuitos de controle mais sofisticados para as chaves, já que estas operam em frequências mais elevadas, ocasionando o aumento das perdas [21].

O controle das chaves acontece por meio da modulação PWM, sendo este a três níveis. Esse tipo de modulação apresenta três níveis distintos de tensão na saída do inversor. A geração dos pulsos de comando é realizada ao comparar dois sinais, um de referência, o modulante, que trata-se de uma onda senoidal e um sinal portador ou modulador no formato dente de serra ou triangular [21]. Como a modulação é em três níveis, é necessário utilizar duas ondas moduladoras defasadas cento e oitenta graus em si, para que assim as chaves de um mesmo seguimento não conduzam no mesmo momento e conseqüentemente, não causem um curto circuito na fonte de tensão. Com isso, as chaves S1 e S4, vistas na figura 15, conduzem simultaneamente, assim como as chaves S2 e S4.

#### 3.4.1.1 Modelagem

A tabela 15 a seguir, expõe cada momento em as chaves devem ser ligadas e desligadas. Como resultante desse processo, obtêm-se as tensões de fase e de linha na saída do inversor.

Tabela 15 – Sequência de Chaveamento do Inversor.

Intervalo	S1	S2	S3	S4	V
0° a 60°	1	0	0	1	+Vcc
60° a 120°	1	0	0	1	+Vcc
120° a 180°	1	1	0	0	0
180° a 240°	0	1	1	0	-Vcc
240° a 300°	0	1	1	0	-Vcc
300° a 360°	0	0	1	1	0

Fonte: autor com base em [18].

Sabendo que a tensão na carga deve ter os mesmos parâmetros da tensão fornecida pela concessionária, ou seja, tensão eficaz de 220 V, e adotando uma resistência de 50  $\Omega$  que simula uma carga, ao resolver a equação 3.47 que é fornecida por [18], pode-se obter a corrente eficaz de saída do inversor, ou seja, a corrente na carga.

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R_c} \quad (3.47)$$

$$I_{rms} = \frac{220}{50}$$

$$I_{rms} = 4,4 \text{ A}$$

A potência absorvida pela carga pode ser obtida com a expressão 3.48, que também é fornecida por [18].

$$P_o = I_{rms}^2 \cdot Rc \quad (3.48)$$

$$P_o = 4,4^2 \cdot 50 = 968 \text{ W}$$

Para que as harmônicas sejam controladas, utiliza-se um filtro LC na saída do inversor, com isso a forma de onda obtida aproxima-se de uma onda puramente senoidal. Para a obtenção da indutância e capacitância de filtro, deve ser seguido os parâmetros estabelecidos na tabela 16.

Tabela 16 – Sequência de Chaveamento do Inversor

Parâmetros para o Filtro LC	
Tensão de alimentação	400 V
Tensão de saída (rms)	220 V
Potência	1000 W
Frequência de comutação	20 kHz
Frequência de elétrica	60 kHz
Varição da tensão de saída	5%
Varição da corrente de saída	30%

Fonte: autor.

Utilizando as equações 3.49 e 3.50, é possível calcular a variação de tensão e corrente na saída do inversor.

$$\Delta V = 5\% \cdot V_{rms} \quad (3.49)$$

$$\Delta V = 5\% \cdot 220V = 11 \text{ V}$$

$$\Delta I = 30\% \cdot I_{rms} \quad (3.50)$$

$$\Delta I = 30\% \cdot 3,11A = 0,933 \text{ A}$$

Para o cálculo da indutância, utiliza-se a equação 3.51 que é fornecida por [22].

$$L = \frac{V_{rms} \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot fs \cdot \Delta I} \quad (3.51)$$

$$L = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot 20000 \cdot 0,933} = 8,33 \text{ mH}$$

Para o cálculo da capacitância é utilizada a equação também fornecida por [22] e que é expressa por 3.52.

$$C = \frac{V_{rms} \cdot \sqrt{2}}{16 \cdot fs^2 \cdot L \cdot \Delta V} \quad (3.52)$$



$$C = \frac{220 \cdot \sqrt{2}}{16 \cdot 20000^2 \cdot 8,33 \cdot 10^{-3} \cdot 11} = 530,54 \text{ nF}$$

#### 3.4.1.1.1 Projeto do Inversor

Tomando como base os parâmetros calculados na seção anterior, foram escolhidos os interruptores para composição desse projeto. Tomou-se como referência, o datasheet da ST Microelectronics e na tabela 17 constam os parâmetros da chave escolhida.

Tabela 17 – Especificações do Mosfet do Inversor.

Mosfet	
Referência (ST Microelectronics)	STF20NM60D
Tensão de Dreno – Source ( $V_{DS}$ )	600 V
Tensão Dreno – Gate ( $V_{DGR}$ )	600 V
Tensão Gate – Source ( $V_{GS}$ )	$\pm 30$
Máxima Corrente de Dreno (Média) ( $I_D$ )	20 A @25°C
Máxima Corrente de Dreno – Pulsada ( $I_{DP}$ )	80 A
Resistência Térmica Junção – Dissipador ( $R_{SD}$ )	0.65-2.8-0.585 °C/W
Resistência Térmica Junção – Ambiente ( $R_{SJA}$ )	62.5-30 °C/W
Resistência de Condução ( $R_{DS}$ )	0.29 $\Omega$
Capacitância de Entrada ( $C_{ISS}$ )	1300 pF
Faixa de Operação Para Temperatura de Junção ( $T_{SJ}$ )	300°C
Tempo de Subida ( $t_r$ )	25 ns
Tempo de Subida ( $t_f$ )	22 ns

Fonte: datasheet.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como objetivo o estudo de todo o sistema utilizado para o processamento da energia proveniente do sistema de geração até a disponibilidade dessa energia para um ponto de consumo.

Primeiramente, foi estudado o processo de retificação da tensão trifásica em corrente alternada proveniente do PMSG, com isso, foram calculados os esforços nos componentes envolvidos neste processo para que assim, houvesse o dimensionamento dos mesmos. Em seguida, foi estudado o processo de conversão CC-CC da tensão, e isso se deu através do conversor elevador boost, que elevou a tensão da saída do retificador e forneceu ao inversor uma tensão de 400 V. Todos os componentes do conversor boost também foram dimensionados, com isso houve a busca dos datasheets comerciais para esses componentes.

Por fim, foi mostrado todo o processo de inversão da corrente proveniente do conversor boost. Nesta etapa, foi mostrado como se dá o controle do chaveamento do

inversor, para que assim, ele possa fornecer a demanda uma potência no nível de tensão em corrente alternada especificada pela rede.

## **CAPÍTULO 4 - MÉTODO DO RESTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA - MPPT**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

O rastreamento do ponto de máxima potência ou MPPT (termo em inglês: *Maximum Power Point Tracker*) é uma técnica utilizada para fornecer à carga de um sistema de geração a potência máxima que esse sistema possa oferecer naquele instante. No caso do sistema eólico tratado neste trabalho, o MPPT terá que fornecer à carga a máxima potência fornecida pelo vento, para isso, há a alteração das características de funcionamento da turbina, levando em consideração a curva ótima de operação da mesma, em que para cada dado de velocidade do vento há uma respectiva potência máxima gerada. Desse modo, deseja-se fazer com que a turbina sempre opere nessas condições do MPP, ou o mais próximo possível [23].

Várias são as técnicas utilizadas para realizar esse rastreamento, técnicas que disponibilizam de algoritmos e ou equipamentos como alto valor agregado [2], porém, por motivo de o sistema ser de pequeno porte, em que o destino de sua utilização evidencia o custo, peso e volume reduzido, o sistema não é composto por instrumentos de medição de variáveis mecânicas tais como, torquímetro, anemômetro ou tacômetro. Por meio disso, o método só pode ser utilizado através da medição das variáveis elétricas, tensão, corrente e, conseqüentemente, a potência. Em decorrência do exposto, este capítulo realiza o estudo de três métodos de rastreamento do ponto de máxima potência que se enquadram a aplicação, porém, apenas 2 métodos são simulados, o de razão cíclica fixa e o Perturbe e Observe, com isso é possível obter um comparativo entre os métodos simulados.

### **4.2 MÉTODO DE MPPT ATRAVÉS DA TABELA DE BUSCAS**

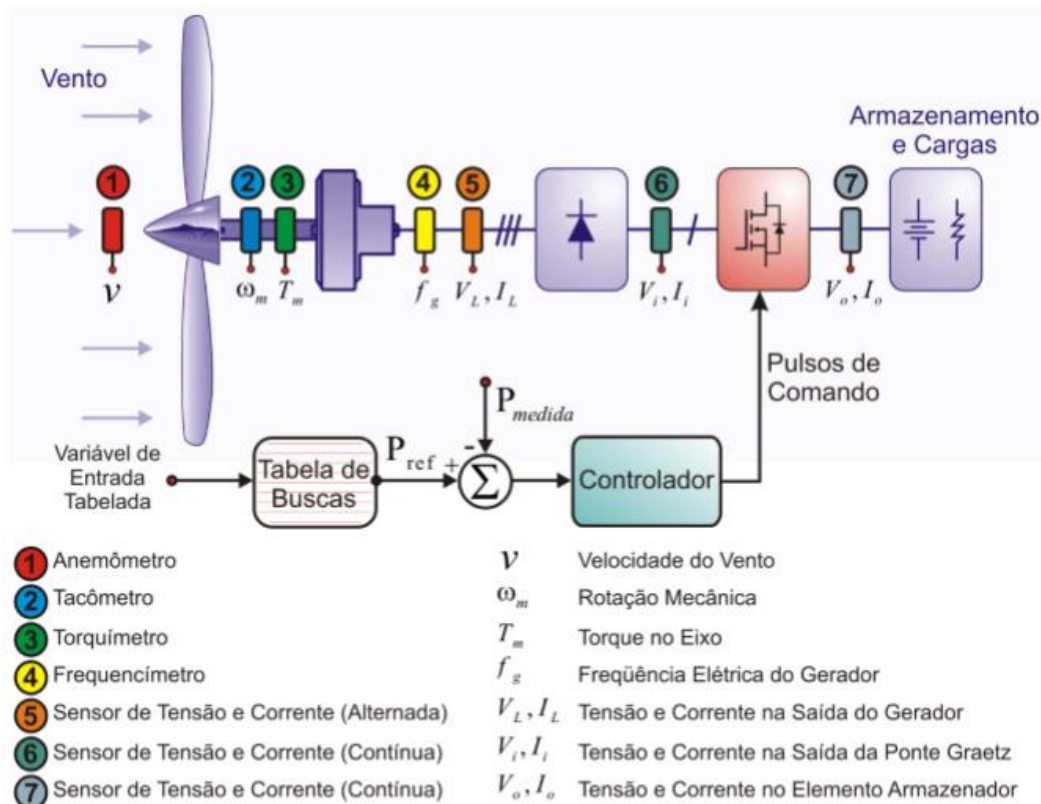
Esse método de MPPT, assim como o mostrado na seção anterior, é fortemente utilizado na indústria de processamento de energia e seu funcionamento se inicia da mesma forma do MPPT pelo método anterior, no qual a partir da leitura das grandezas mecânicas, velocidade do vento, torque no eixo ou frequência elétrica do gerador, ou grandezas elétricas, tensão, corrente ou potência, em algum ponto do sistema. Assim, a partir dessas leituras, há a comparação com os dados que foram armazenados em uma tabela

“programada” a qual foi gerada a partir da curva ótima de geração, então sabe-se qual é a potência máxima disponível com referência aos dados de leitura, portanto, através do erro, pode-se mudar a razão cíclica do conversor para que a turbina possa operar no ponto de máxima potência [2].

A figura 17 que é apresentada por [2], apresenta um diagrama esquemático que exemplifica o sistema eólico munido com o rastreamento aqui descrito. Na figura, podemos observar que o sistema contém vários sensores, com isso, pode-se obter, de várias formas, a potência, tanto para identificar a máxima disponível, como para observar potência instantânea que está sendo fornecida pelo sistema [24].

O sistema apresentado na figura 16 configura-se como um sistema comercial de alto valor agregado, pois é composto por vários tipos de sensores, o que aumenta seu volume e, conseqüentemente seu peso, embora o método utilizado para o MPPT seja de baixo custo.

Figura 16 – Diagrama esquemático de um sistema eólico munido com MPPT utilizando tabela de busca.



Fonte: [2].

Esse método de busca pelo ponto de máxima potência apresenta um fator decisivo para sua escolha, ele só é aplicável após o conhecimento de todas as características do sistema, sendo necessária a curva exata de potência para a turbina, assim como todas as

características do gerador, que são descobertas a partir de vários ensaios, além de que as variações paramétricas podem causar interferência no processo e fazer o sistema operar fora do ponto de máxima potência [25] e [2].

### 4.3 CONTROLE DO CONVERSOR ATRAVÉS DA RAZÃO CÍCLICA FIXA

Esse método de MPPT é o mais simples no quesito de complexidade de implementação. Sua modelagem se dá a partir de um único ajuste de tensão, corrente e potência no ponto de máxima potência, isso para determinadas características parametrizadas do sistema. Para isso, a razão cíclica (D) do conversor é pré-estabelecida para se obter o ponto em que a máxima potência seja drenada.

A razão cíclica escolhida depende unicamente das tensões de entrada e saída do conversor Boost e pode ser obtida seguindo a equação (3.21) exposta no Capítulo 3 deste trabalho e que é rerepresentada a seguir.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o}$$

O modelo de gerador utilizado para a simulação computacional já foi descrito ao longo dessa obra, em que para uma velocidade do vento na ordem de 12 m/s, o gerador fornece uma tensão de linha de 130 V, que multiplicada por 0,955 que é a relação entre a tensão de entrada e saída do retificador, com isso, obtêm-se 124,15 V na saída do retificador, que por sua vez é a tensão de entrada do conversor Boost.

Utilizando a tensão de entrada do conversor Boost e a tensão de saída que foi especificada nos parâmetros do conversor, calcula-se a razão cíclica.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = \frac{400 - 124,15}{400} = 0,689$$

Para controlar a chave do conversor de maneira que a razão de abertura e fechamento seja igual ao da razão cíclica calculada anteriormente, compara-se uma onda dente-de-serra cujo valor de pico é de 1V com uma fase constante com amplitude igual valor da razão cíclica desejada. Com isso o comparador controla o gatilho da chave para operar naquele ponto de máxima potência estipulado.

A grande desvantagem desse método é que o sistema só irá operar no ponto de máxima potência quando os parâmetros estipulados para a definição da razão cíclica forem atingidos, ou seja, quando o gerador atingir a tensão nominal.

As formas de ondas obtidas serão mostradas no capítulo 5.

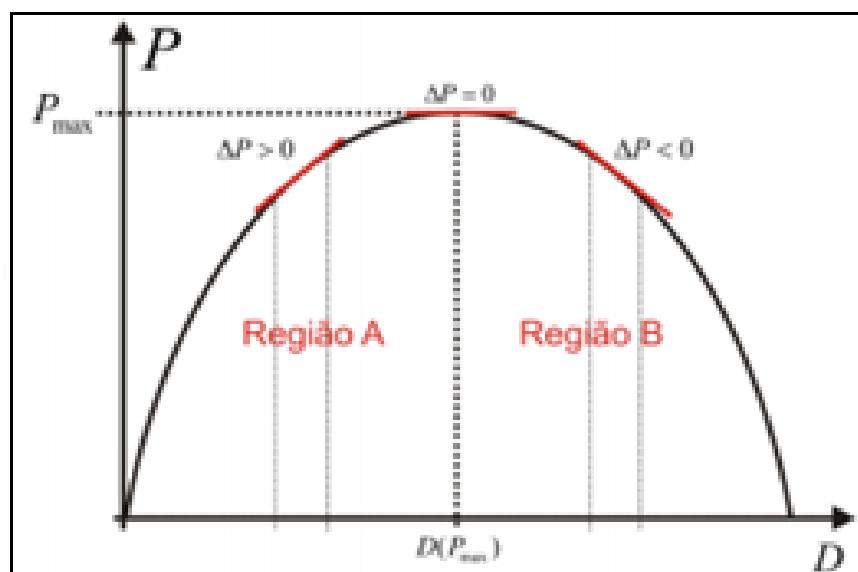
### 4.4 MÉTODO DE MPPT PELO ALGORITMO PERTURBE & OBSERVE (P&O)

Este método se dá por conta do algoritmo denominado Perturbe & Observe (P&O), utilizado também para o rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos.

Esse algoritmo varia a razão cíclica e por essa variação, a tensão de saída do conversor será alterada e, conseqüentemente, a potência instantânea gerada também sofrerá variação [25]. Conhecendo o valor da potência instantânea, é possível identificar em qual região da curva de potência, exposta na figura 17, o sistema está trabalhando, assim, o algoritmo compara se essa potência instantânea é maior ou menor que a potência registrada em um ciclo anterior. Variações positivas de potência indicam que a perturbação contribuiu para o aumento da potência instantânea, com isso, o próximo incremento da razão cíclica continuará a ser positivo. Por outro lado, variações negativas de potência indicam que a perturbação não contribuiu para a elevação da potência instantânea, assim, no próximo ciclo haverá um decremento na razão cíclica [26]. A figura 17 traz o gráfico ilustrativo do princípio de rastreamento do ponto máxima potência (MPP) utilizado nessa obra.

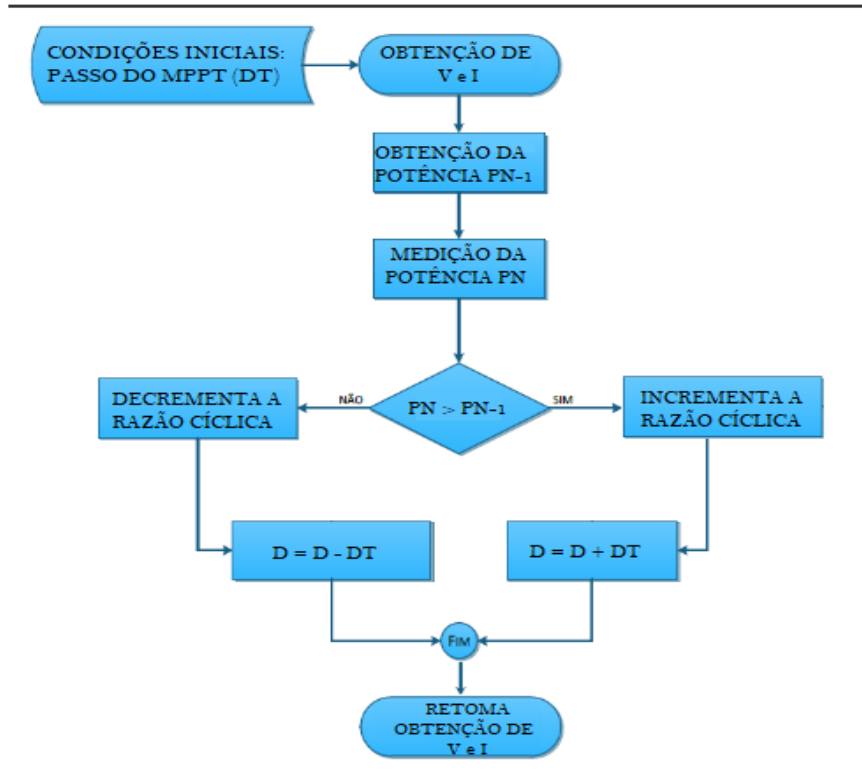
Para que a técnica do “Perturbe & Observe” tenha uma boa eficiência, é importante fazer a escolha adequada para o incremento ou decremento da perturbação, pois se o valor incremental for muito elevado, o sistema atingirá rapidamente o MPP, entretanto, resultará em grandes oscilações em torno do MPP. Por outro lado, para um incremento baixo, o algoritmo irá demorar a encontrar o MPP. A Figura 17 apresenta uma representação generalizada de como acontece o rastreamento do ponto de máxima potência.

Figura 17 – Gráfico ilustrativo generalizado do princípio de rastreamento do ponto de máxima potência com o algoritmo Perturbe & Observe.



O diagrama de implementação do método P&O que foi empregado no rastreamento do ponto de máxima potência do sistema apresentado nesse trabalho, é apresentado na figura 18.

Figura 18 – Fluxograma MPPT Eólico por Perturbe e Observe.



Fonte: autor.

Na primeira fase do P&O os dados provenientes de sensores mecânicos ou elétricos são recebidos e processados. Na fase (2) a potência é processada e armazenada, com isso, na fase (3) acontece à comparação e/ou diferença entre o valor recebido com os valores em memória. Dessa forma, os resultados obtidos na fase (3) são enviados a fase (4) e esta, por sua vez, incrementa ou decrementa a razão cíclica na chave do conversor de acordo com os resultados da fase (3), e então o ciclo é reiniciado. A figura 19 apresenta um diagrama de blocos que geralmente é seguido para se ter o rastreamento do ponto de máxima potência.

Figura 19 – Diagrama de blocos do MPPT.



Fonte: autor.

As formas de ondas obtidas com essa simulação serão apresentadas do Capítulo 5 deste trabalho.

#### **4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram apresentadas algumas técnicas utilizadas para o rastreamento do ponto de máxima potência que são aplicáveis a um sistema eólico.

O algoritmo Perturbe & Observe, assim como o método de rastreamento através de tabela de busca, são os métodos mais utilizados, podendo ainda ser aplicados em outras fontes de energia, assim como na energia solar, além desses dois métodos apresentarem resultados eficientes com um valor de mercado acessível.

O método da razão cíclica fixa também apresenta resultados satisfatórios, desde que o sistema seja bem dimensionado para as características do ambiente de implantação e estas devem ser as mais constantes possíveis, o que não é encontrado com facilidade no setor eólico.

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E SIMULAÇÕES

### 5.1 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Utilizou-se os dados do aerogerador para aplicação no software PSIM de simulação computacional e, ao obter os resultados, houve a comparação entre os dados que foram gerados através da simulação e os que foram calculados seguindo a literatura. Constam na tabela 18 os resultados que foram obtidos para o sistema de geração de energia.

Tabela 18 – Resultados calculados e simulados do sistema de geração.

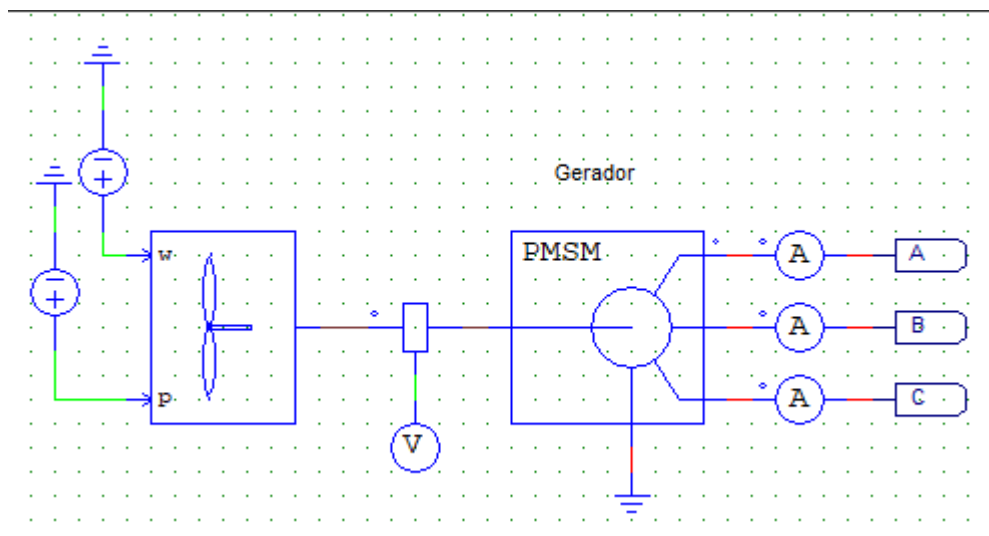
Dados da Placa		Calculados		Simulados	
Tensão de Fase (rms)	75 V	Tensão de fase (rms)	53,03 V	Tensão de fase (rms)	56,69 V
Número de Polos	14	Potência por fase	333,33 W	Potência por fase	333,76 W
Rotação Nominal	700 RPM	Frequência elétrica	81,67 Hz	Frequência elétrica	81,06Hz
Potência Nominal	1000 W	Corrente de linha ou fase (rms)	6,285 A	Corrente de linha ou fase (rms)	6,32 A

Fonte: autor.

Ao observar os valores, nota-se uma pequena diferença entre os valores calculados e os valores que foram obtidos através da simulação. A tensão simulada apresentou um erro de 6%, já para a corrente, esse foi bem mais reduzido, o que leva a desconsideração do mesmo, conseqüentemente, o erro da tensão se dissolve ao calcular a potência, com isso, pode-se concluir que a simulação foi fiel aos cálculos.

A figura 20 expõe o modelo do sistema de geração de energia que foi utilizado para a simulação.

Figura 20 – Sistema de geração de energia utilizado na simulação.

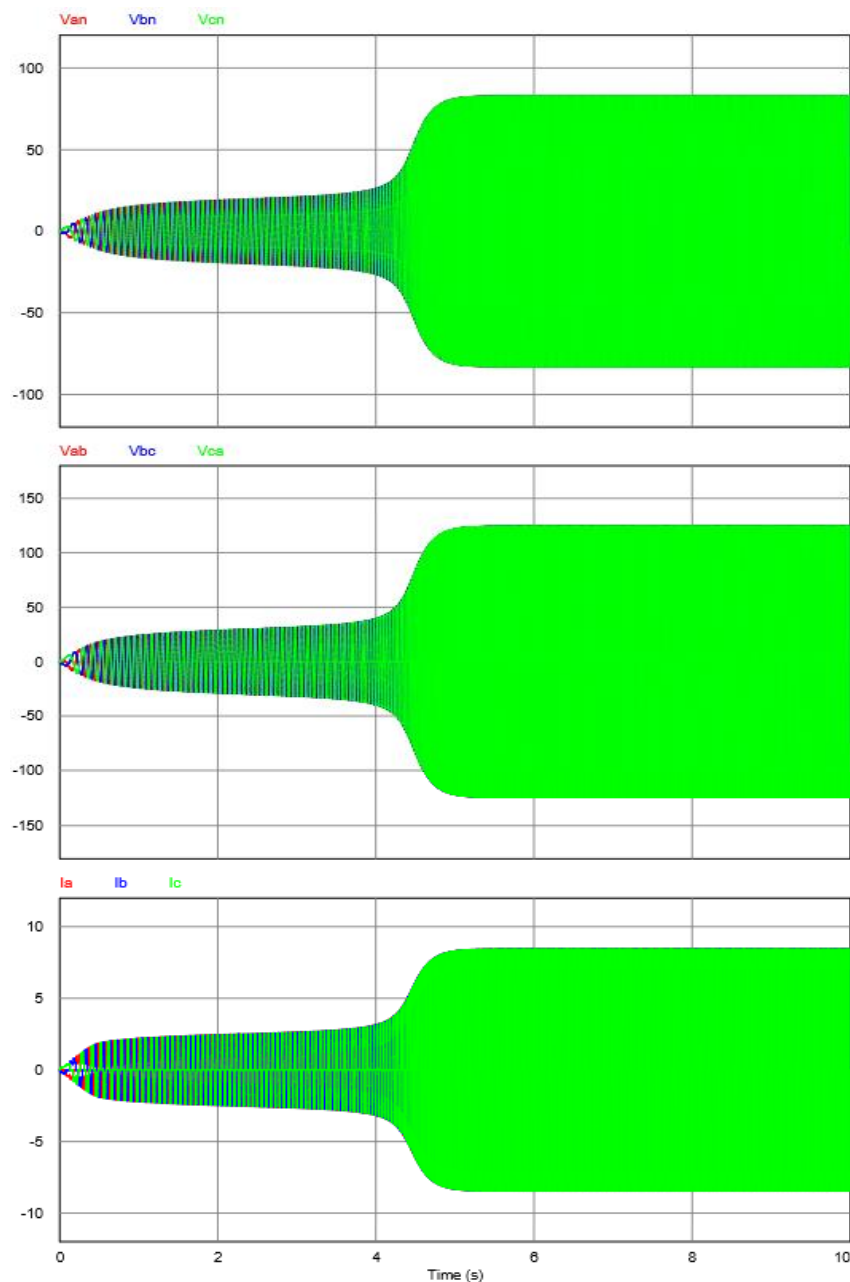


Fonte: autor.



Na figura 21, são apresentadas as formas de onda obtidas com a simulação do modelo proposto pela figura 20. O tempo de simulação foi de 10 segundos, tempo suficiente para que o gerador saia do momento transitório e se estabilize em seu potencial máximo para a velocidade do vento de 12 m/s, ainda é importante destacar a influência que a indutância e da resistência interna do gerador exercem no tempo transitório do sistema.

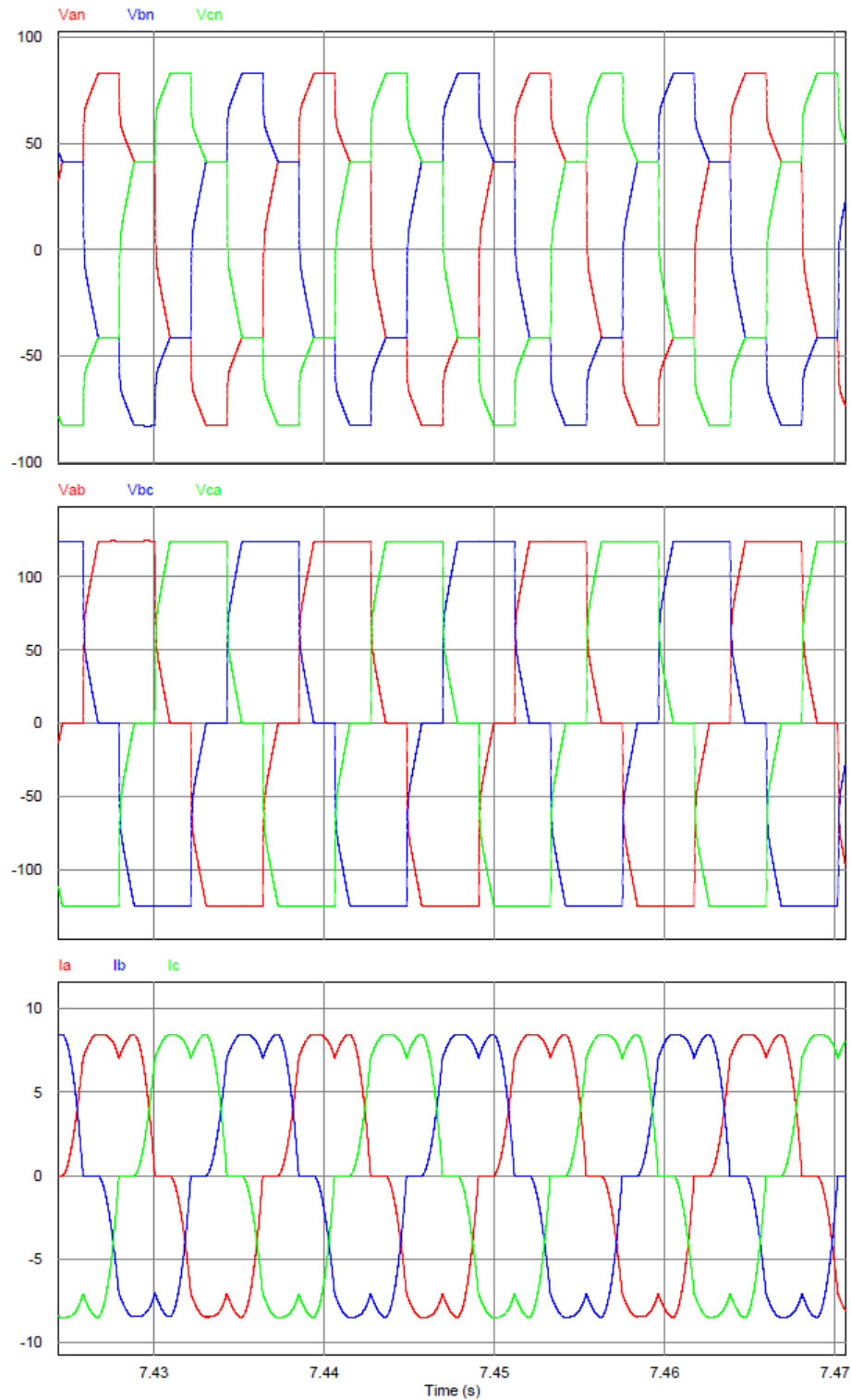
Figura 21 – Respectivas formas de ondas das tensões de fase, linha e da corrente do sistema durante todo o tempo de simulação.



Fonte: autor.

A figura 22 a seguir traz as formas de ondas da tensão de fase, de linha e da corrente que foram obtidas após a estabilização do sistema e um período de 0,05 segundos.

Figura 22 – Respectivas formas de ondas das tensões de fase, tensões de linha e as correntes do gerador.



Fonte: autor.

Observa-se que as formas de onda não são ondas senoidais puras, isso se dá devido às interferências ocasionadas pelo sistema de processamento de energia, que não possui correção ativa do fator de potência. Por fim, o sistema de geração de energia que foi

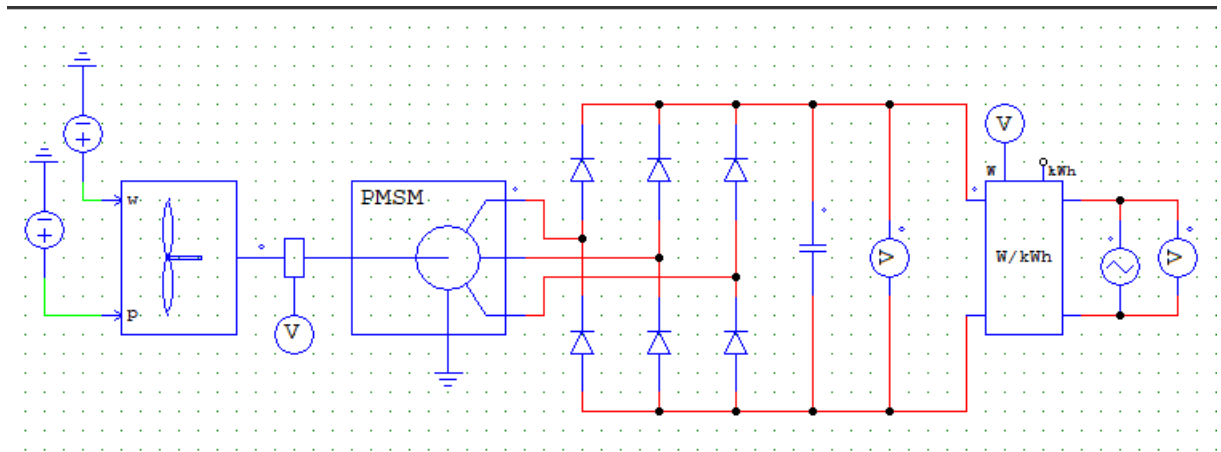
simulado, comportou-se como o esperado, fornecendo parâmetros semelhantes aos calculados.

## 5.2 OBTENÇÃO DA CURVA DE MÁXIMA POTÊNCIA DO GERADOR EÓLICO

Os parâmetros da turbina eólica já foram expostos ao longo deste trabalho e levados ao ambiente de simulação, no qual é possível realizar ensaios para se obter a curva de MPP para diversas velocidades do vento, assim, ao implementar o MPPT pode-se haver uma comparação entre os valores de potência para uma dada velocidade do vento.

A simulação para esta seção se dá com a adição de uma fonte de tensão triangular na saída do retificador, como mostrado na figura 23. Essa fonte de tensão deve ser configurada com uma tensão de pico cujo valor seja superior ao valor da tensão retificada, com isso é possível visualizar toda a evolução da curva de potência do gerador.

Figura 23 – Modelo de simulação utilizado para obtenção da curva de MPP.

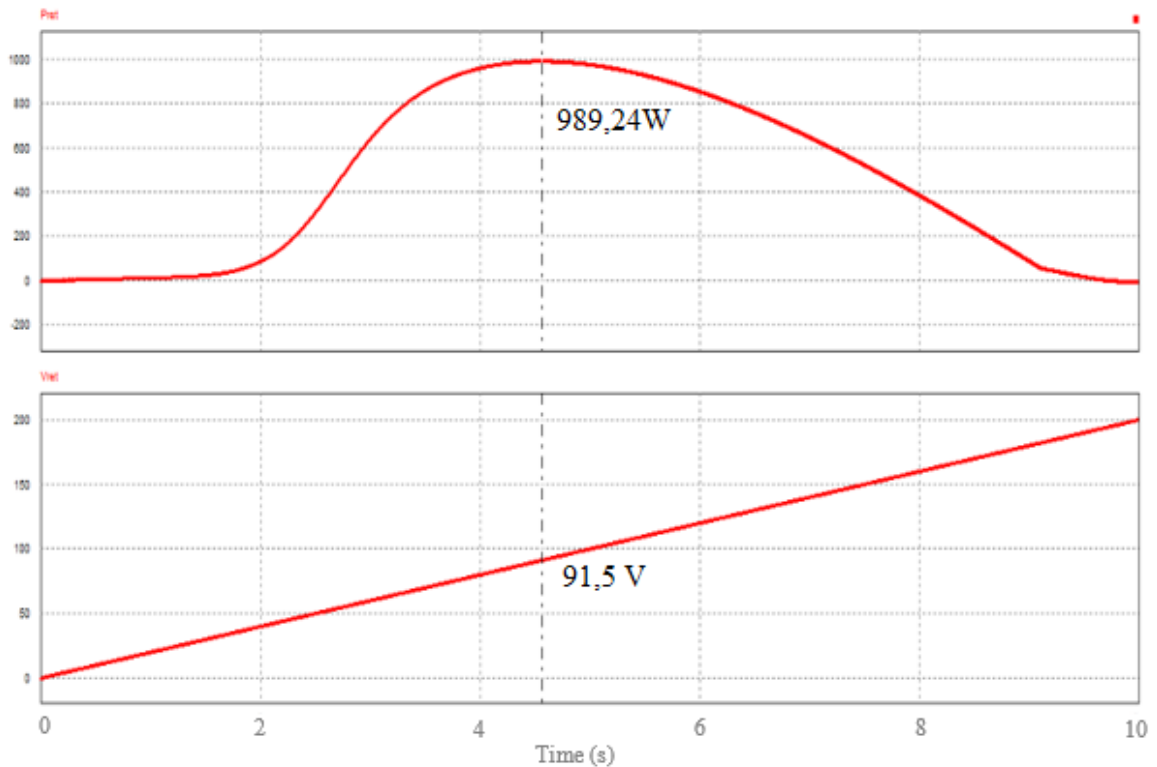


Fonte: autor.

Segundo [6], com a variação da tensão retificada há também uma variação de impedância nos terminais do gerador, o que conseqüentemente ocasiona uma variação da tensão de fase gerada que por sua vez exerce influência sobre a frequência rotórica do gerador ( $f_g$ ). Contudo, ao observar a forma de onda referente à potência de saída, verifica-se que há um ponto em que a potência extraída pelo gerador é máxima.

Apresenta-se na figura 24 a forma de onda da potência de saída obtida durante um determinado tempo de simulação. A velocidade do vento foi fixada em 12m/s e a faixa de operação da tensão triangular foi de 0 a 200V. Com essas configurações, foi obtida uma máxima potência para a velocidade do vento expressa anteriormente, sendo ela na ordem de 989,24 W para uma tensão de 91,5 V.

Figura 24 – Formas de ondas da curva de potência e da tensão retificada, respectivamente.



Fonte: autor.

Sabe-se que, para cada velocidade do vento, há uma máxima potência transferida para a carga, com isso, foram realizadas simulações variando a velocidade do vento de 6 a 12 m/s.

Com isso, ao observar a figura 19 percebe-se que mesmo o aerogerador possuindo velocidade de partida na ordem de 2,2 m/s, durante a simulação descrita ao longo deste trabalho, o sistema só começou a gerar energia a partir dos 6 m/s. O resultado das simulações é encontrado na tabela 19.

Tabela 19 – Resultados máximos de tensão, corrente e potência para cada velocidade do vento.

V (m/s)	$V_i$ (V)	$I_i$ (A)	$P_i$ (W)
6	56,34	0,8	45,22
6,5	59,35	1,6	88,55
7	62,35	2,78	155,73
7,5	64,64	3,59	208,25
8	67,99	4,22	262,78
8,5	71,47	4,86	324,43
9	74,91	5,54	393,39
9,5	77,81	6,33	471,41
10	80,98	7,16	809,82

Fonte: autor.

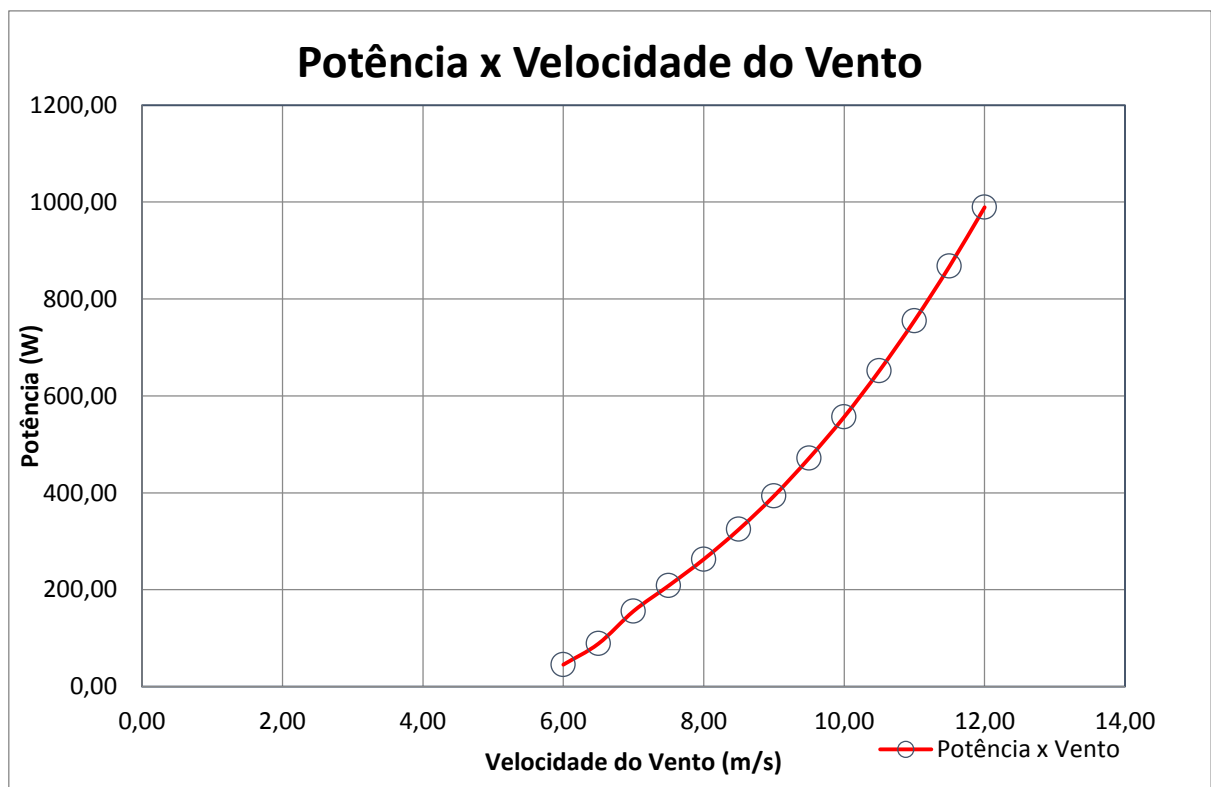
Tabela 19 – Resultados máximos de tensão, corrente e potência para cada velocidade do vento (continuação).

V (m/s)	Vi (V)	li (A)	Pi (W)
11	86,56	9,1	755,15
11,5	89,32	10,13	867,56
12	91,5	11,32	989,24

Fonte: autor.

Utilizado os dados encontrados na tabela 18, foi possível obter a curva de Potência para cada velocidade do vento amostrada, com isso, ao consultar o gráfico representado na figura 25, pode-se obter a respectiva potência para uma dada velocidade do vento.

Figura 25 – Curva de Potência x Velocidade do Vento.



Fonte: autor.

Como mencionado anteriormente, durante a simulação, a turbina aplicada neste estudo teve o início de geração de energia a partir de velocidades do vento superiores a 6 m/s, mesmo o aerogerador tendo velocidade de partida é de 2,2 m/s.

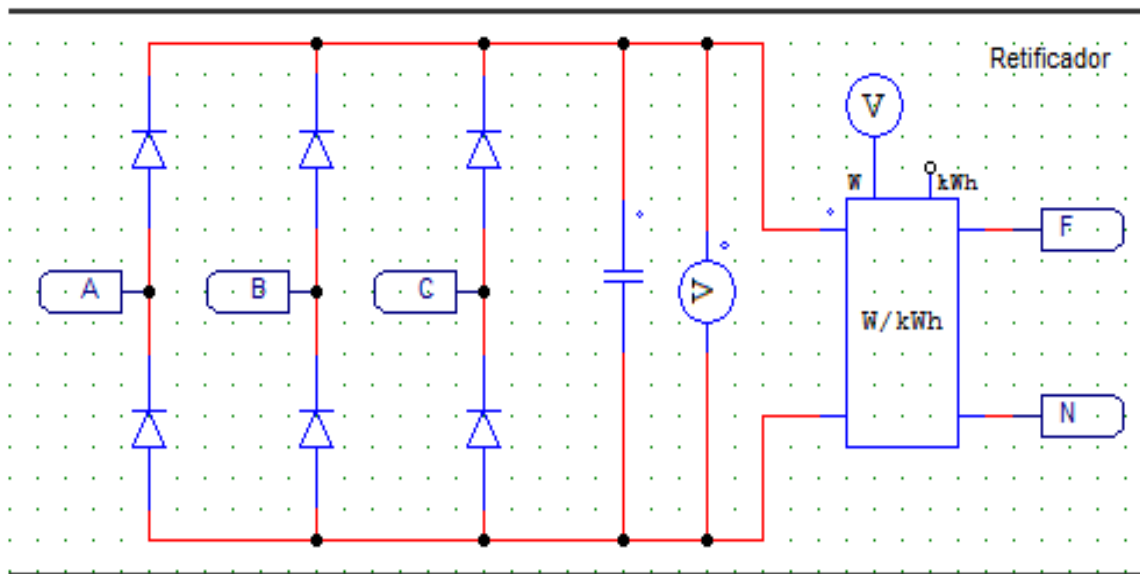
### 5.3 RETIFICADOR

O processo de retificação do sinal que foi gerado na seção anterior deu-se através do modelo de simulação que é apresentado na figura 26. O parâmetro do filtro capacitivo foi

calculado no Capítulo 3, contudo, de posse dos dados calculados o retificador foi simulado e os resultados obtidos apresentam-se a seguir.

O retificador simulado obteve sucesso em seu funcionamento e a tabela 20, apresenta os dados que foram calculados em comparação aos dados que foram obtidos através da simulação. Observando a figura 26, na saída do retificador, há um Wattímetro que é para a conferência da potência que está sendo processada pelo retificador.

Figura 26 – Modelo do retificador utilizado na simulação do projeto.



Fonte: autor.

Tabela 20 – Resultados calculados e simulados do retificador.

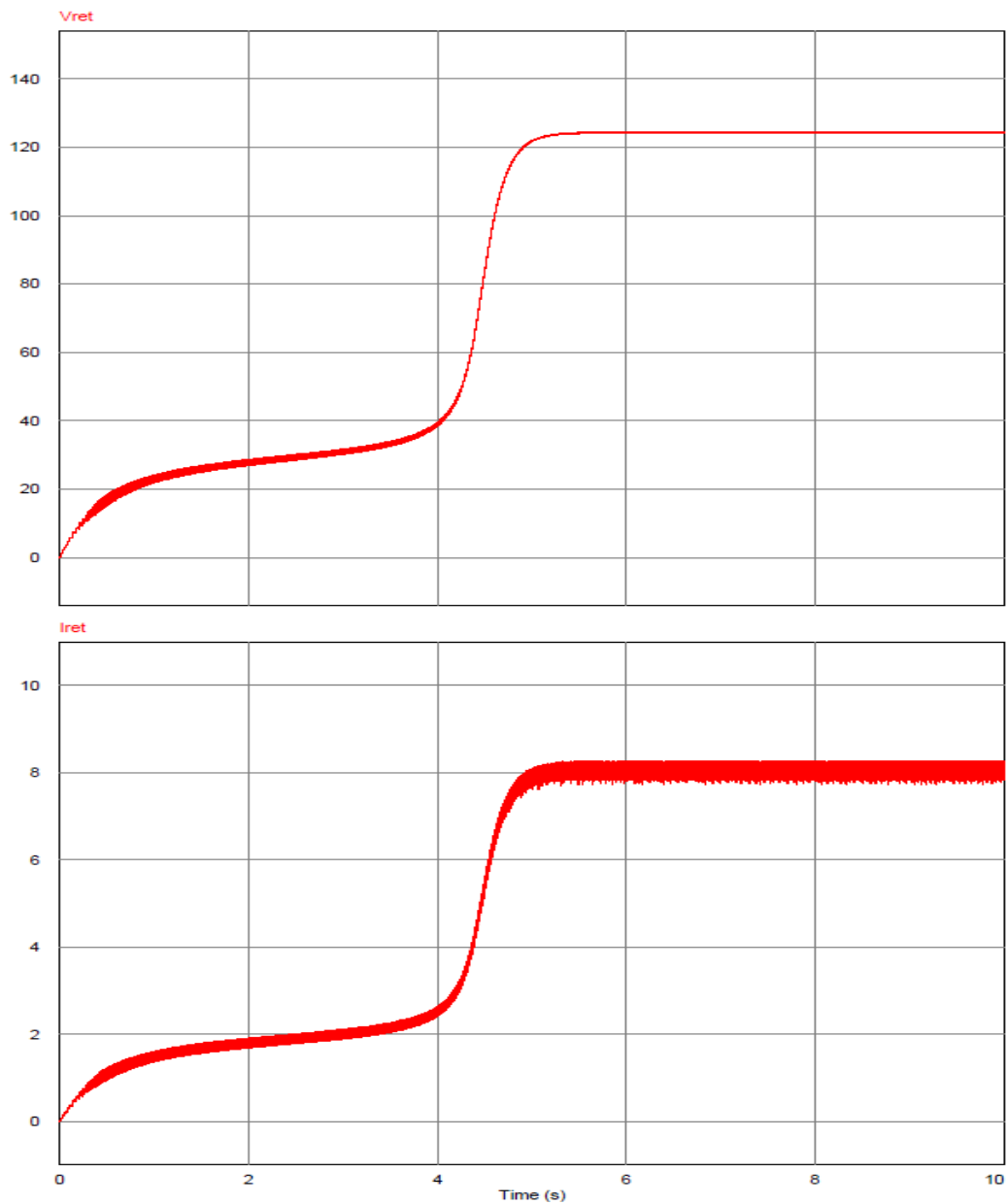
Dados	Parâmetros Calculados	Parâmetros Simulados
Tensão média de saída	124,15 V	124,32 V
Corrente média de saída	8,05 A	7,93 V
Tensão de pico na carga	127,25 V	125,06 V
Corrente de pico na carga	8,26 A	8,20
Potência	999,4 W	984,92 W

Fonte: autor.

Observa-se que a variação entre os dados calculados e os simulados é mínima, evidenciando que a simulação foi fiel ao que se é apresentado na literatura.

Na figura 27, são apresentadas as curvas de tensão e de corrente obtidas durante a simulação de 10 segundos e é evidente o tempo transitório que o sistema leva para se estabilizar e fornecer à carga a potência nominal para a velocidade do vento determinada em 12 m/s.

Figura 27 – Respectivas formas de ondas da tensão e da corrente após a retificação.

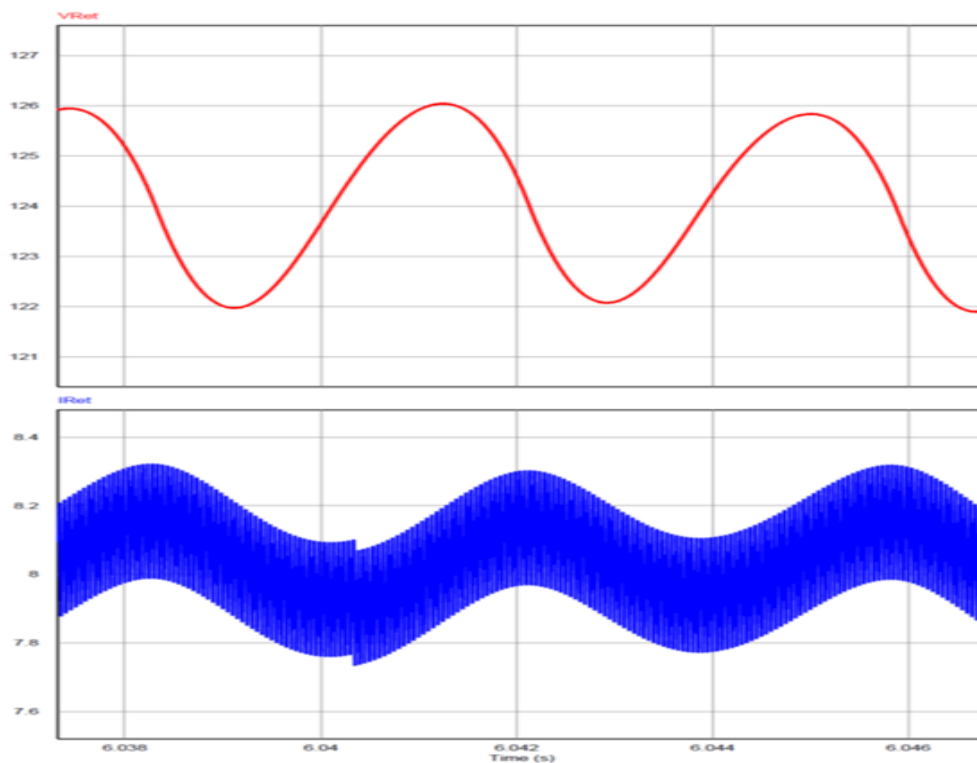


Fonte: autor.

A figura 28 a seguir traz as formas de ondas da tensão e da corrente na saída do retificador, tais formas de ondas foram obtidas após a estabilização do sistema e um período de 0,06 segundos. O ripple de tensão na saída do retificador resultou em 0,2 V estando, este valor, dentro da faixa estabelecida para o projeto. Já o ripple de corrente resultou em 0,27 A, também obedecendo ao nível estabelecido.

As formas de onda apresentadas nas figuras 27 e 28, mostram que o sistema de retificação operou eficientemente, fornecendo uma de tensão em corrente contínua para o conversor Boost que terá seus resultados apresentados na seção seguinte.

Figura 28 – Forma de onda da tensão e da corrente obtidas na saída do retificador após a estabilização do sistema em um período de 0,06s.

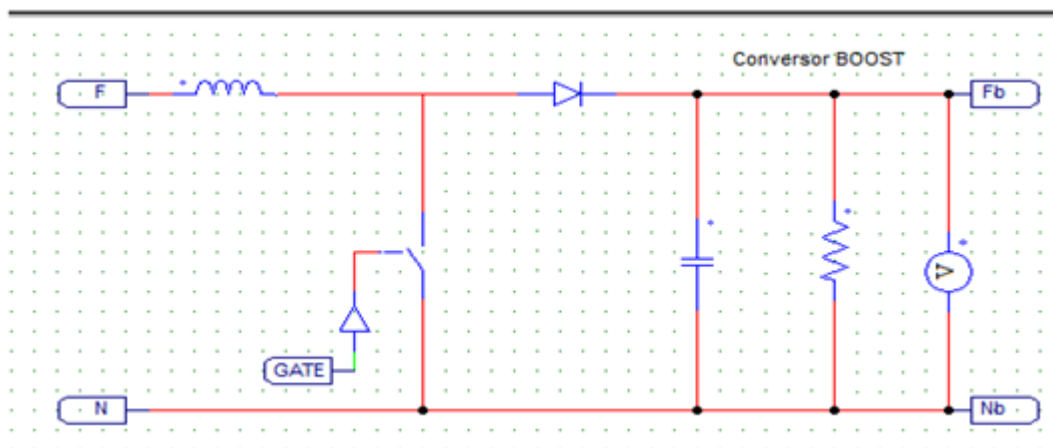


Fonte: autor.

## 5.4 CONVERSOR BOOST

Como mencionado neste trabalho, o conversor boost é alimentado com a tensão da saída do retificador e, exercendo sua função, eleva sua tensão de saída para os valores estabelecidos nos critérios de projeto. Todos os parâmetros que foram calculados no Capítulo 3 foram inseridos na simulação e o modelo utilizado encontra-se na figura 29.

Figura 29 – Modelo do conversor Boost utilizado na simulação do projeto.



Fonte: autor.



Foram seguidas todas as equações presentes em literatura para determinação dos parâmetros do conversor boost. Ao calcular todos esses parâmetros, os mesmos foram comparados com os resultados obtidos através da simulação computacional e os resultados estão presentes na tabela 21.

Tabela 21 – Resultados calculados e simulados do conversor Boost CC - CC.

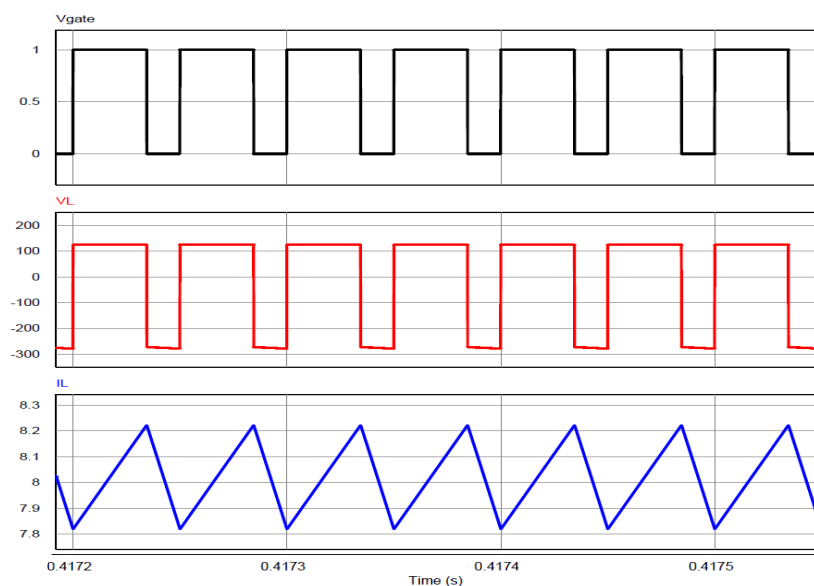
Dados	Parâmetros / Calculados	Parâmetros Simulados
Tensão de entrada	124,15 V	123,64
Corrente de entrada	8,05 A	8,01 A
Tensão na chave	-399,15 V	-408 V
Corrente máxima na chave	8,25 A	8,16 A
Tensão no Diodo	-275 V	-274,36 V
Corrente máxima no diodo	8,25 A	8,22 A
Tensão de saída	399,19 V	398 V
Corrente de saída	2,49 A	2,48 A
Potência	993,98 W	990,37 W

Fonte: autor.

Analisado os dados presentes na tabela anterior, observa-se que os que foram obtidos através da simulação sofreram poucas variações se comparado com os dados obtidos através das equações de projeto, tendo variação média na ordem de 0,6%, sendo essa variação desprezada por não ser significativa, concluindo-se que a simulação foi fiel aos cálculos.

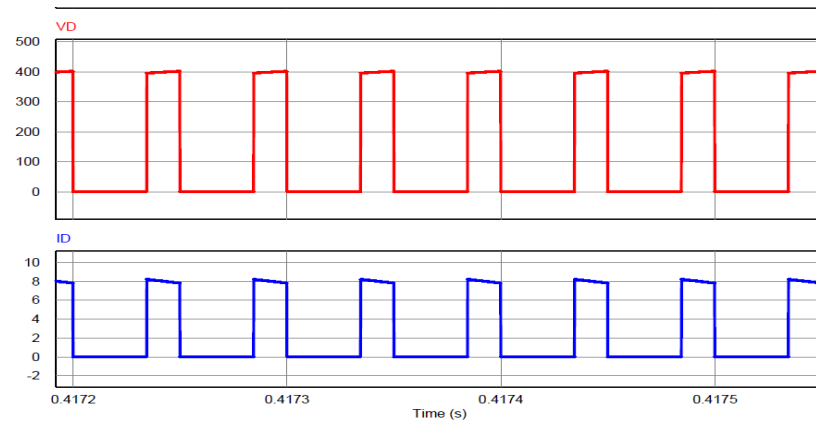
Na figura 30 estão presentes todas as formas de ondas dos componentes do conversor.

Figura 30 – Formas de onda da tensão do gatilho, corrente e tensão no indutor, corrente e tensão no diodo.



Fonte: autor.

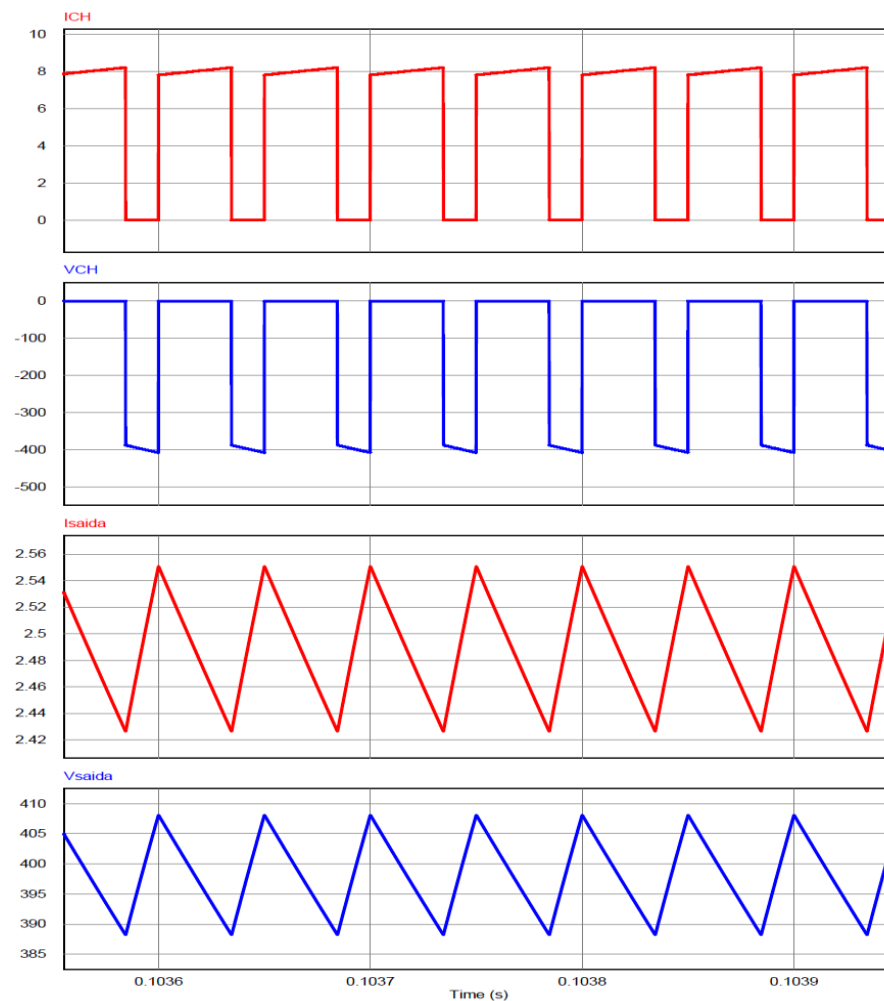
Figura 30 – Formas de onda da tensão do gatilho, corrente e tensão no indutor, corrente e tensão no diodo (continuação).



Fonte: autor.

Na figura 31 estão presentes todas as formas de ondas dos componentes do conversor.

Figura 31 – Formas de onda da corrente e tensão na chave, corrente e tensão da saída dos componentes do conversor Boost.



Fonte: autor.

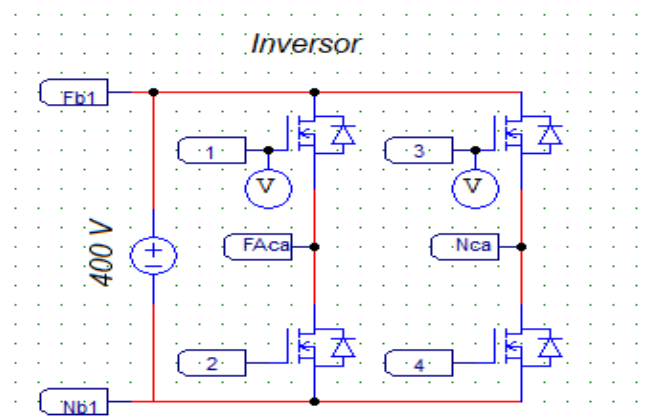
Observando a corrente de entrada do conversor Boost, ou seja, a corrente através do indutor, nota-se a ondulação típica deste componente, já que ela aumenta linearmente enquanto a chave encontra-se fechada e, ao abrir, a corrente decresce rapidamente, indicando o descarregamento do indutor. Já a tensão, no momento em que a chave encontra-se ligada, se iguala ao nível da fonte e, com o desligamento da chave, a energia que estava armazenada no campo magnético do indutor é transferida para o capacitor, com isso a polarização da tensão será alternada e passa a se somar com a tensão da fonte. Como a corrente neste componente é atrasada em relação à tensão, quando o indutor descarrega a tensão chega a níveis negativos, tendo valor máximo negativo no momento em que o indutor se descarrega por completo e então a chave fecha e o mesmo passa a se carregar.

Todas as formas de ondas presentes nas figuras 30 e 31 seguiram as mesmas formas que constam na literatura. Contudo, o conversor Boost operou satisfatoriamente e forneceu ao inversor uma potência próxima de 1000W a uma tensão de 400V. As ondulações presentes na tensão e corrente na saída atingiram níveis satisfatórios para o projeto, ficando dentro das especificações estipuladas, porém, tais ondulações seriam minimizadas com o aumento do filtro capacitivo, o que aumentaria o valor do sistema.

## 5.5 INVERSOR

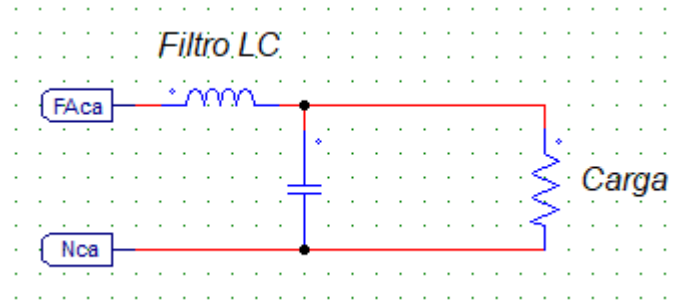
O inversor é a parte final do sistema de processamento de energia, ele é alimentado com o sinal proveniente do conversor Boost e sua saída é o ponto de entrega da energia. Como o funcionamento do inversor depende de chaveamento, houve o projeto do acionamento das mesmas. O comando do inversor foi explanado na seção 3.4.1 desse trabalho. Encontra-se nas figuras 32 e 33, respectivamente, o modelo do inversor utilizado na simulação, assim como o modelo de comando utilizado.

Figura 32 – Modelo do inversor utilizado na simulação.



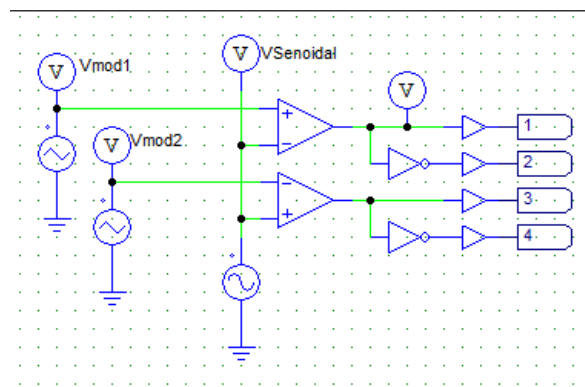
Fonte: autor.

Figura 32 – Modelo do inversor utilizado na simulação (continuação).



Fonte: autor.

Figura 33 – Modelo do controlador das chaves utilizado na simulação.



Fonte: autor.

Com o projeto de simulação do inversor obtido, após a simulação, foi possível obter os parâmetros do inversor e os resultados dos parâmetros estão contidos na tabela 22.

Tabela 22 – Resultados calculados e simulados do inversor CC - CA.

Dados	Calculados	Simulados
Potência (W)	968 W	963,46 W
Tensão eficaz (V)	220 V	219,48 V
Tensão de pico (V)	311,12 V	311,12 V
Corrente eficaz (A)	4,4 A	4,38 A
Resistência de Carga ( $\Omega$ )	50 $\Omega$	50 $\Omega$

Fonte: autor.

Ao analisar os dados contidos na tabela anterior, foi observado no inversor, assim como no conversor boost, não houveram variações significativa entre os resultados calculados e simulados.

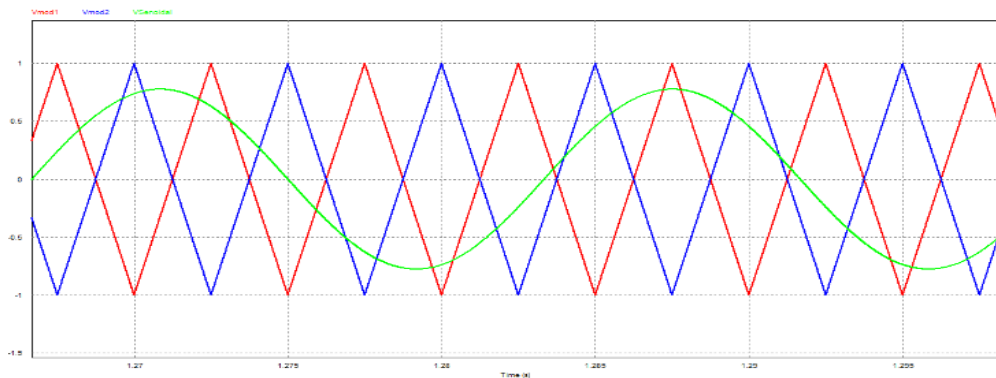
Por motivo das perdas do chaveamento e, por o sinal obtido na saída do conversor boost possuir muitos ruídos, o banco capacitor que interligaria o conversor e o inversor e, conseqüentemente filtraria o sinal, foi substituído por uma fonte de tensão cujo valor de sua amplitude é o valor nominal da saída do conversor, assim, o funcionamento do inversor durante a simulação se deu de forma idealizada.

Como foi conectada uma fonte de tensão da na saída do conversor boost, o funcionamento do inversor se deu de maneira teórica, já que a própria forma de onda na saída do mesmo será igual à da tensão fornecida pela concessionária. O inversor atuou no processo de inversão do sinal CC obtido através do Boost em um sinal CA, contudo, esse componente atendeu a sua função de aplicação para sistema de processamento energético e forneceu a demanda uma tensão em corrente alternada.

Foram obtidas também as formas de ondas do inversor, onde pode ser comprovado o fornecimento de corrente alternada em sua saída.

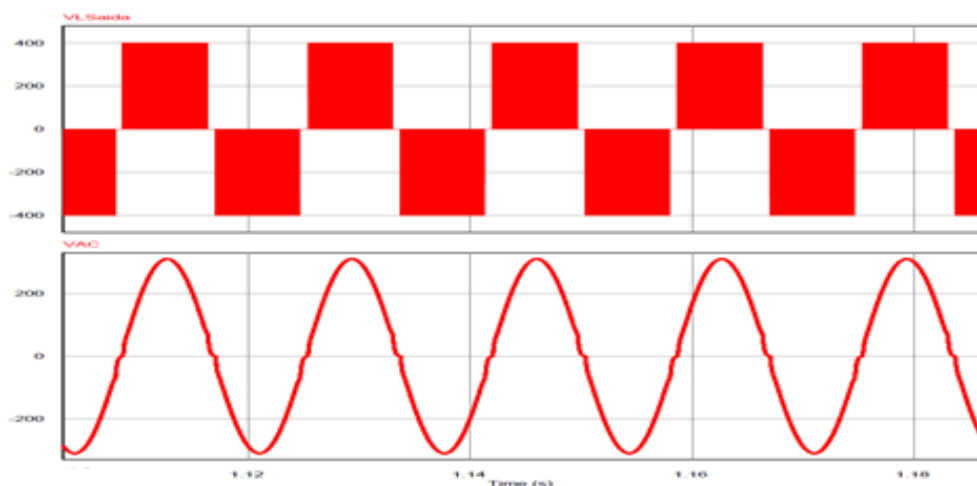
Para obtenção da figura 34, utilizou-se nas ondas triangulares moduladoras frequência menor do que a de projeto. Essa metodologia foi adotada apenas para melhor percepção, já que as ondas moduladoras possuem frequência muito superior a frequência da onda senoidal modulante. As formas de onda do inversor componente são apresentadas na figura 34 e 35.

Figura 34 – Tensões de modulação do inversor.



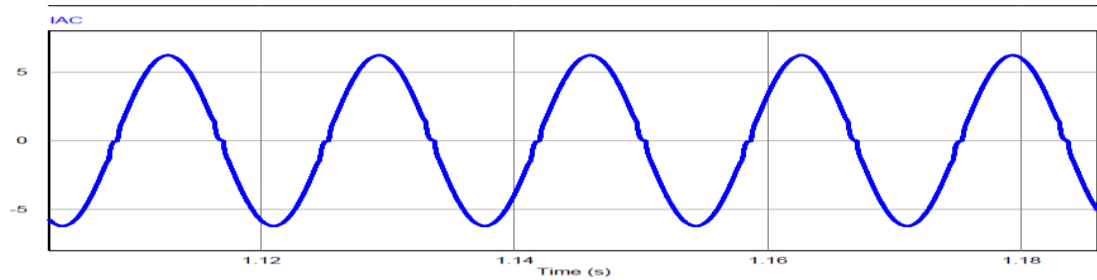
Fonte: autor.

Figura 35 – Formas de onda da tensão na saída do inversor, tensão na carga e corrente na carga, respectivamente.



Fonte: autor.

Figura 35 – Formas de onda da tensão na saída do inversor, tensão na carga e corrente na carga, respectivamente (continuação).



Fonte: autor.

## 5.6 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

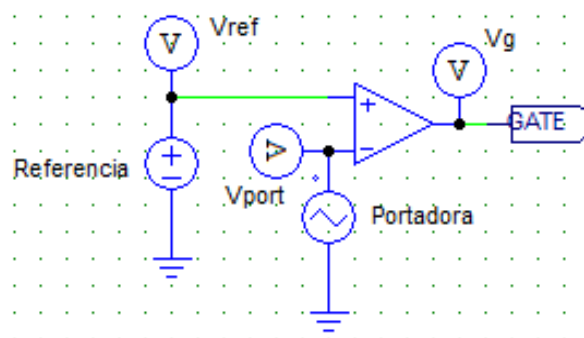
Este é o capítulo foco desse trabalho, onde é realizado o estudo de alguns métodos utilizados para o rastreamento do MPP, sendo mostrados seus pontos negativos e positivos. Foi explanada também, a técnica geral do funcionamento desses métodos, contudo, foram apresentados os métodos mais utilizados e que possuem um ótimo custo benefício agregado.

Foram simulados dois métodos para o rastreamento do ponto de máxima potência. Inicialmente foi utilizado o método da razão cíclica constante e, posteriormente foi aplicado o algoritmo Perturbe e Observe. Com isso, pôde-se comparar os dois métodos e definir qual método se adequa mais para a aplicação neste trabalho.

### 5.6.1 Razão Cíclica Fixa

Para o estudo do sistema com a aplicação da razão cíclica constante, é necessário aplicar um sistema de controle para abertura e fechamento da chave do conversor. O controle da chave se dá ao comparar um sinal de fase constante e amplitude igual a razão cíclica desejada com uma onda dente de serra com valor de pico de 1 V, com isso, pode-se obter um sinal intermitente que é ligado à chave e, cuja razão de abertura e fechamento é a própria razão cíclica. A figura 36 apresenta o modelo utilizado na simulação.

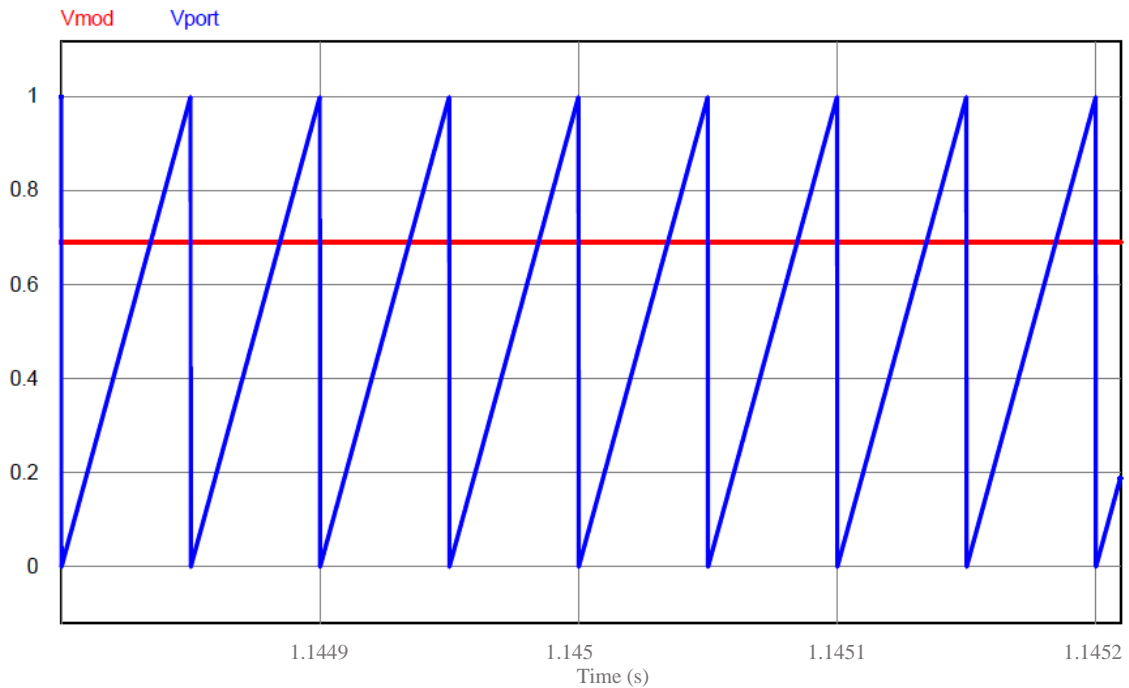
Figura 36 – Diagrama do sistema para modulação de uma razão cíclica fixa.



Fonte: autor.

Na figura 37 pode-se encontrar as duas formas de ondas comparadas, uma com o valor de sua amplitude igual ao valor da razão cíclica e outra dente de serra com valor de pico de 1 V.

Figura 37 – Razão cíclica fixa e tensão dente de serra.



Fonte: autor.

A fase que tem valor igual ao da razão cíclica é conectada à entrada positiva do comparador e esta é denominada como tensão modulante, por sua vez, o sinal dente de serra, que é denominado como portador é conectado ao borne inversor, com isso, a referência de condução é justamente a onda de fase constante.

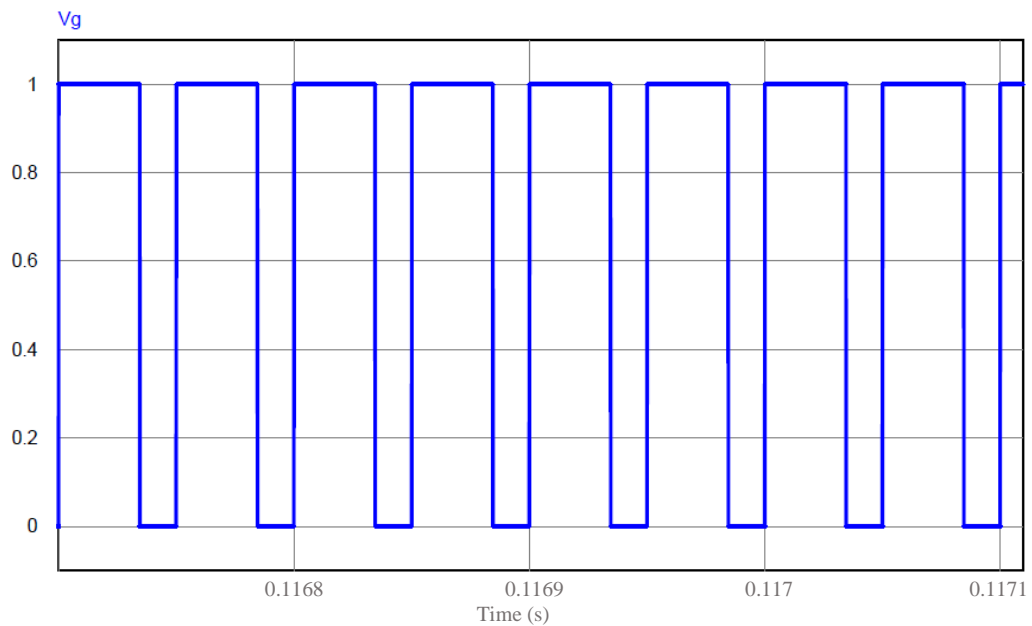
A tensão de saída do comparador é dada seguindo a lógica a seguir: o comparador calcula a diferença entre o sinal modulante e o sinal portador, então quando o valor da onda triangular é menor do que o da tensão de referência, a saída é igual a 1 V, no momento em que o valor dos sinais se igualam, quando a onda triangular cruza a modulante, a diferença é igual a 0, então a tensão de saída vai para 0 V e permanece nesse nível até que a diferença volte e ser maior que 0, assim o sinal intermitente é criado e ligado a chave do conversor Boost.

Como esperado, esse modelo de simulação gerou um sinal intermitente variando de 0 a 1 V e a forma de onda obtida na saída do controlador é apresentada na figura 38.

Para a simulação completa do sistema utilizando o método descrito nesta seção, foi utilizado o modelo computacional que consta no Apêndice A.

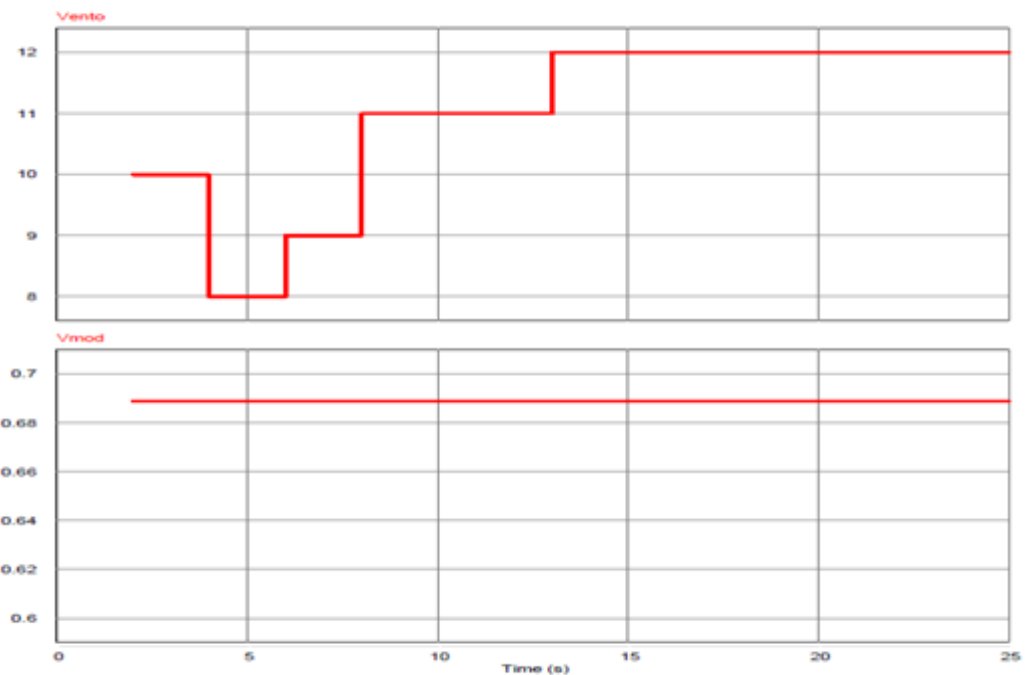
O sistema foi alimentado com uma velocidade do vento variável, assim, a simulação torna-se mais próxima das condições reais de aplicação. O período de simulação foi de 25 segundos, período suficiente para que o vento possa assumir vários níveis de velocidade. Na figura 39 constam as formas de ondas obtidas com a simulação do sistema.

Figura 38 – Tensão utilizada no chaveamento do conversor boost.



Fonte: autor.

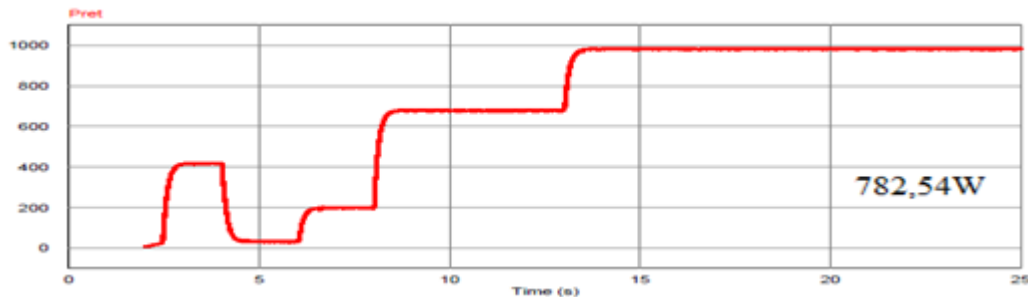
Figura 39 – Representação da velocidade do vento, razão cíclica fixa e potência processada pelo sistema, respectivamente.



Fonte: autor.



Figura 39 – Representação da velocidade do vento, razão cíclica fixa e potência processada pelo sistema, respectivamente (continuação).



Fonte: autor.

Observando a figura 39, percebe-se que a potência processada é proporcionalmente relacionada com a velocidade do vento, e isso se dá devido à razão cíclica ter valor constante, 0,689, conseqüentemente, a máxima potência só é processada apenas quando o sistema opera com a velocidade nominal. Ao operar fora da velocidade nominal, 12 m/s, o sistema opera fora do ponto de MPP.

Calculando a potência processada pelo sistema para o período de simulação, é obtido 782,54 W.

Contudo, o método da razão cíclica fixa que foi utilizada nesta simulação, conseguiu processar a potência do sistema, fornecendo a máxima potência quando a velocidade do vento atingia seu valor nominal, porém, quando não, o sistema não foi aproveitado satisfatoriamente. A aplicação desse método não se mostra viável, já que o vento possui grande variação de sua velocidade.

### 5.6.2 Perturbe & Observe

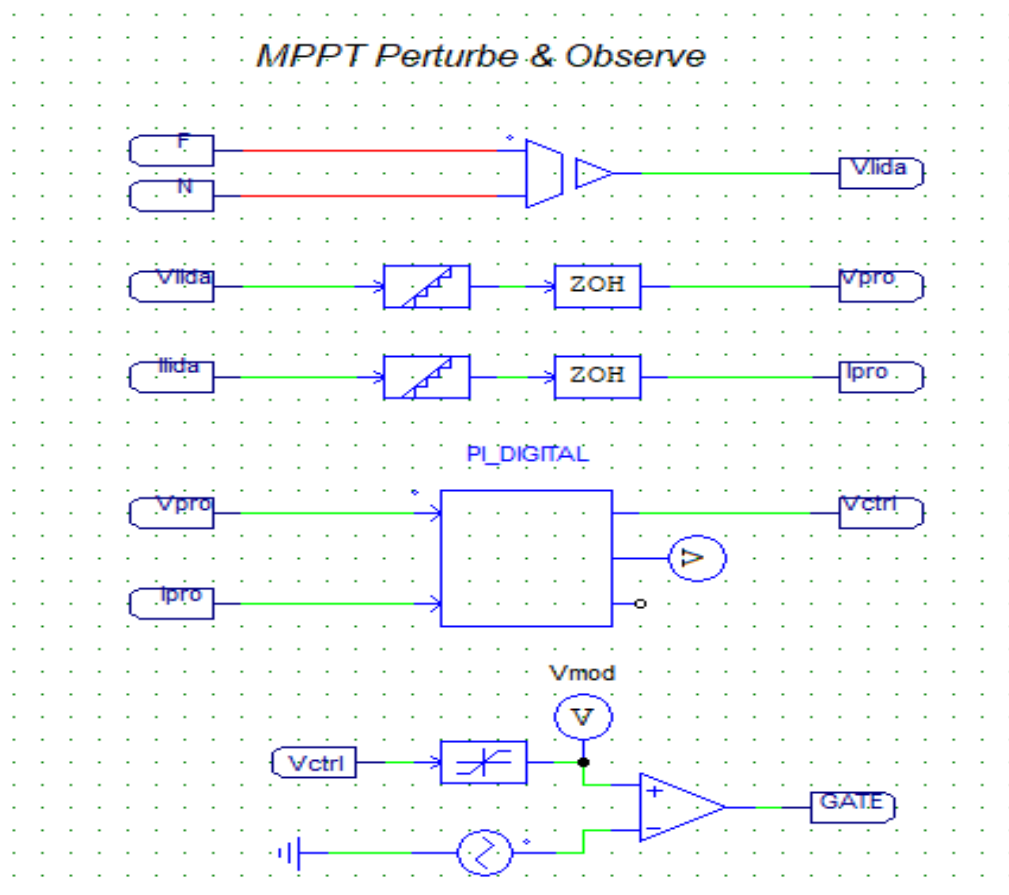
Para o estudo do sistema com a aplicação do MPPT através do algoritmo Perturbe e Observe, foi necessário a modelagem de um sistema que realize a busca pelo ponto de máxima potência. A busca por esse ponto se deu da seguinte forma. Primeiramente foram instalados sensores de tensão e corrente na saída do retificador, com isso, é possível obter a leitura da potência, sendo esta, a própria potência retificada pelo sistema naquele instante. Os dados obtidos através dos sensores de tensão e corrente foram enviados para os blocos de quantificação, com isso, há o mapeamento dos dados dentro de um intervalo especificado para um valor comum, assim os valores obtidos pelos sensores são convertidos em valores digitais. Os resultados obtidos com a quantificação são enviados aos blocos de amostragem, esse bloco, por sua vez, de acordo com a frequência predefinida de amostragem, realiza a

leitura da entrada e a mantém até que sejam obtidos novos dados de entrada, ou seja, a próxima leitura de tensão e corrente.

Após essa etapa, os dados são enviados ao Bloco C, onde a lógica expressa no fluxograma representado na figura 19 foi transformada em um algoritmo utilizando a linguagem de programação C. Tal algoritmo, o Perturbe & Observe, está exposto no Apêndice C e sua função já foi estudada na seção 4.3 desta obra.

Por fim, a saída do Bloco C, foi conectada a entrada positiva do bloco comparador que, igual na seção anterior, há a comparação deste sinal com um sinal dente de serra, assim é obtido na saída do comparador um sinal intermitente que é o controlador da chave do conversor Boost. A razão de abertura e fechamento da chave é calculada através o algoritmo P&O escrito no bloco C. Esta razão depende dos valores lidos pelos sensores. Consta na figura 40 o modelo do MPPT utilizado na simulação.

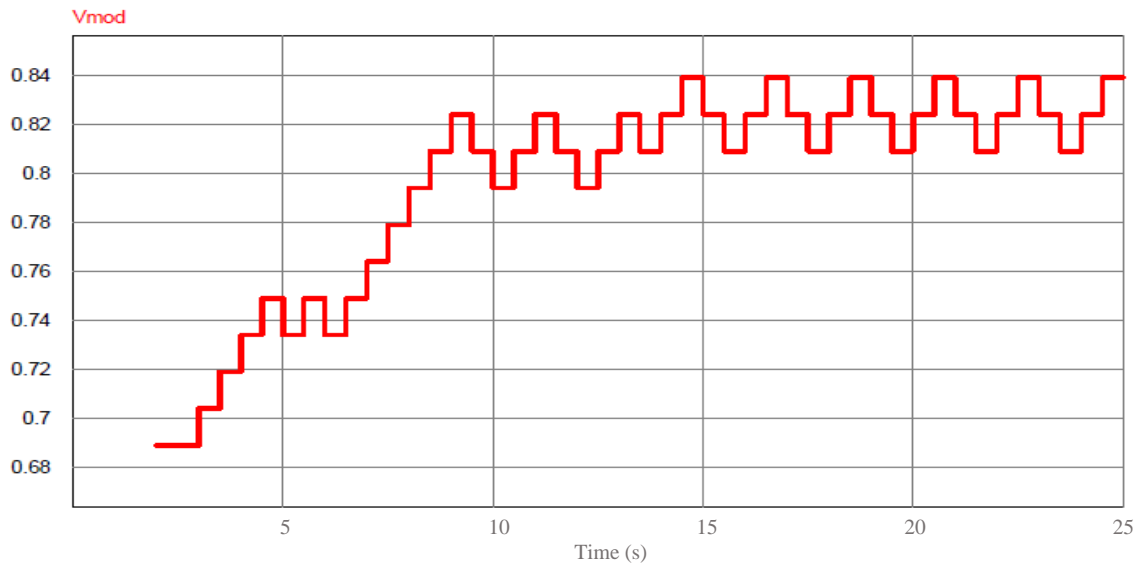
Figura 40 – Modelo do MPPT utilizado na simulação.



Fonte: autor.

Na figura 41 pode-se encontrar a forma de onda da razão cíclica obtida através do algoritmo perturbe e observe.

Figura 41 – Evolução da razão cíclica ao longo de 25 segundos de simulação.

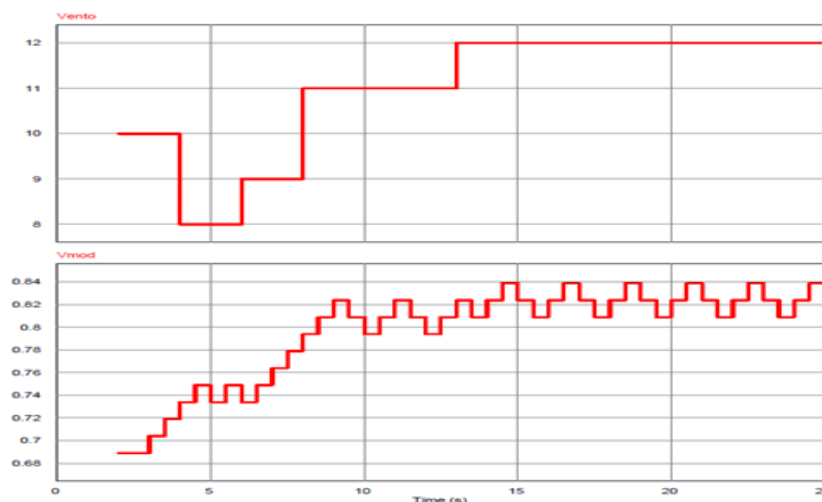


Fonte: autor.

Ao observar a figura 41, percebe-se que razão cíclica fica variando ao longo de todo o período de simulação, essa variação é decorrente do algoritmo que fica incrementando e decrementando a razão cíclica para que o sistema sempre opere na máxima potência para a velocidade do vento naquele instante.

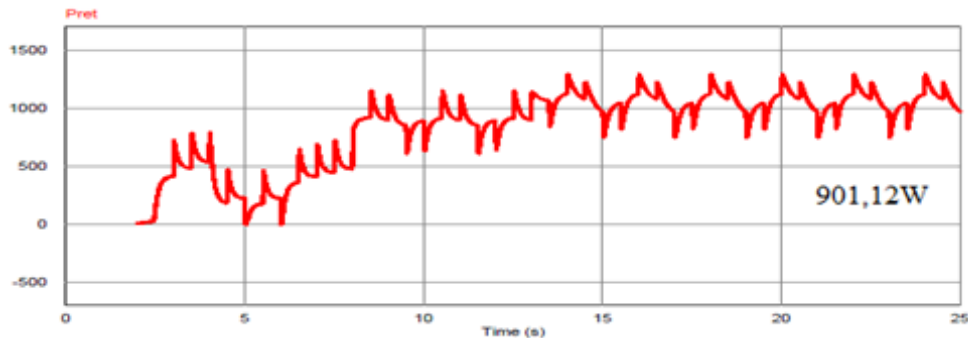
As mesmas características do vento utilizadas na simulação do método anterior também foram utilizadas para esse método, com isso é possível fazer uma comparação entre os dois métodos simulados. Na figura 42, consta a representação das formas de onda do vento, da razão cíclica e da potência processada pelo sistema durante a simulação de 25 segundos utilizando o algoritmo de MPPT Perturbe e Observe.

Figura 42 - Representação da velocidade do vento, razão cíclica variável e potência processada pelo sistema, respectivamente.



Fonte: autor.

Figura 42 - Representação da velocidade do vento, razão cíclica variável e potência processada pelo sistema, respectivamente (continuação).



Fonte: autor.

Ao comparar a figura 42 com a figura 39, observa-se que com a utilização do MPPT através do P&O a potência dissipada já não sofre variação proporcional a velocidade do vento como acontece com o MPPT de razão cíclica fixa, nesta utilização, o algoritmo trata a razão cíclica de maneira que o sistema possa aproveitar o máximo de potência disponível para aquela velocidade, com isso, o sistema tem melhor aproveitamento.

Ao calcular a potência durante todo o período de simulação, obteve-se uma potência da ordem de 901,12 W, sendo esse valor 13,16% maior que a potência processada pelo método anterior.

Contudo, o método de rastreamento do ponto de máxima potência pelo algoritmo P&O, mostrou-se eficiente durante todo o período de simulação, fornecendo sempre a máxima potência e, mesmo com a variação a velocidade do vento, a potência dissipada foi a maior possível para as condições do vento.

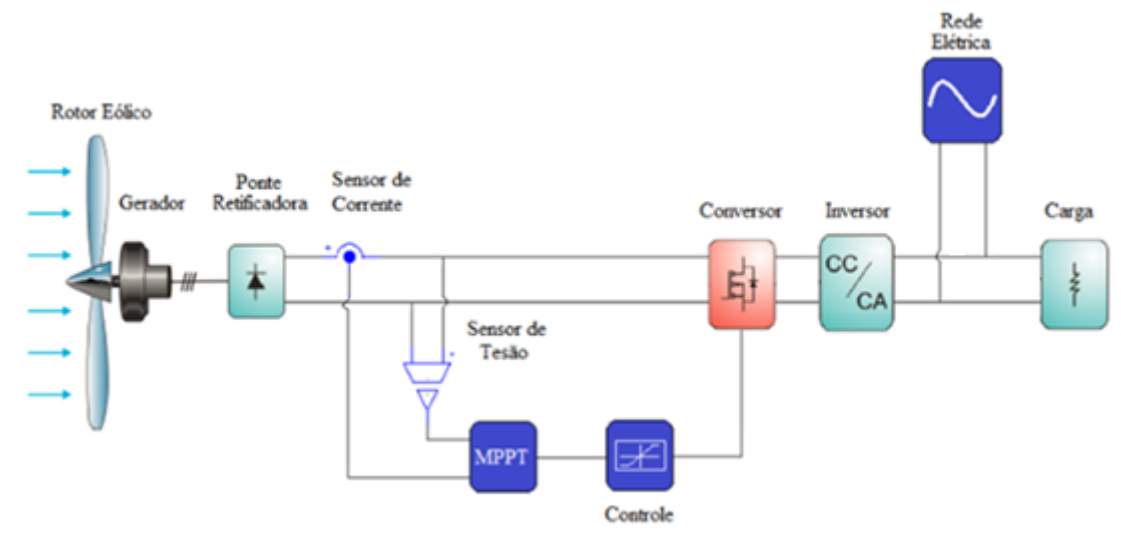
## 5.7 SIMULAÇÃO COMPLETA DO SISTEMA

A simulação completa do sistema é realizada com o intuito de se comprovar que o mesmo teve seu funcionamento conforme calculado, além de se verificar os esforços nos componentes. Para esta simulação, foi projetado um modelo esquemático computacional que consta no Apêndice B, porém na figura 43 que é mostrada a seguir, representa a organização do modelo utilizado.

Para a simulação, foi adotado o funcionamento nominal do sistema, ou seja, com a velocidade do vento a 12 m/s, com isso, consegue-se a máxima corrente para o conversor. Na figura 44 são apresentadas as formas de onda dos esforços de tensão e corrente nos componentes da ponte retificadora Greatz. Como esperado, a máxima tensão reversa sobre os diodos da ponte, não se iguala à máxima fornecida pelo PMSG e isso ocorre devido à necessidade de alimentação direta de polarização. Contudo a tensão reversa nos diodos teve

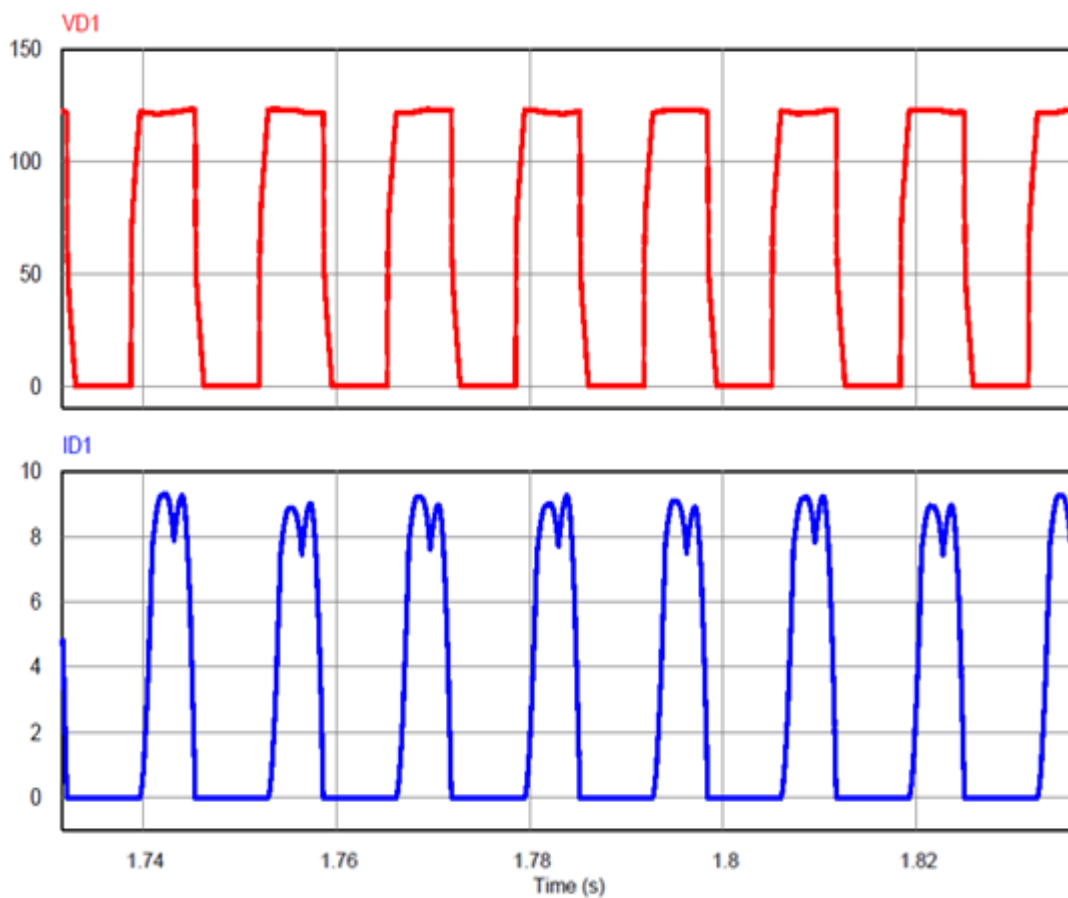
seu valor na ordem de 125,22 V. Já as correntes máxima e média obtidas são, respectivamente, 8,54 A e 4,69 A.

Figura 43 – Representação do modelo utilizado nesta simulação.



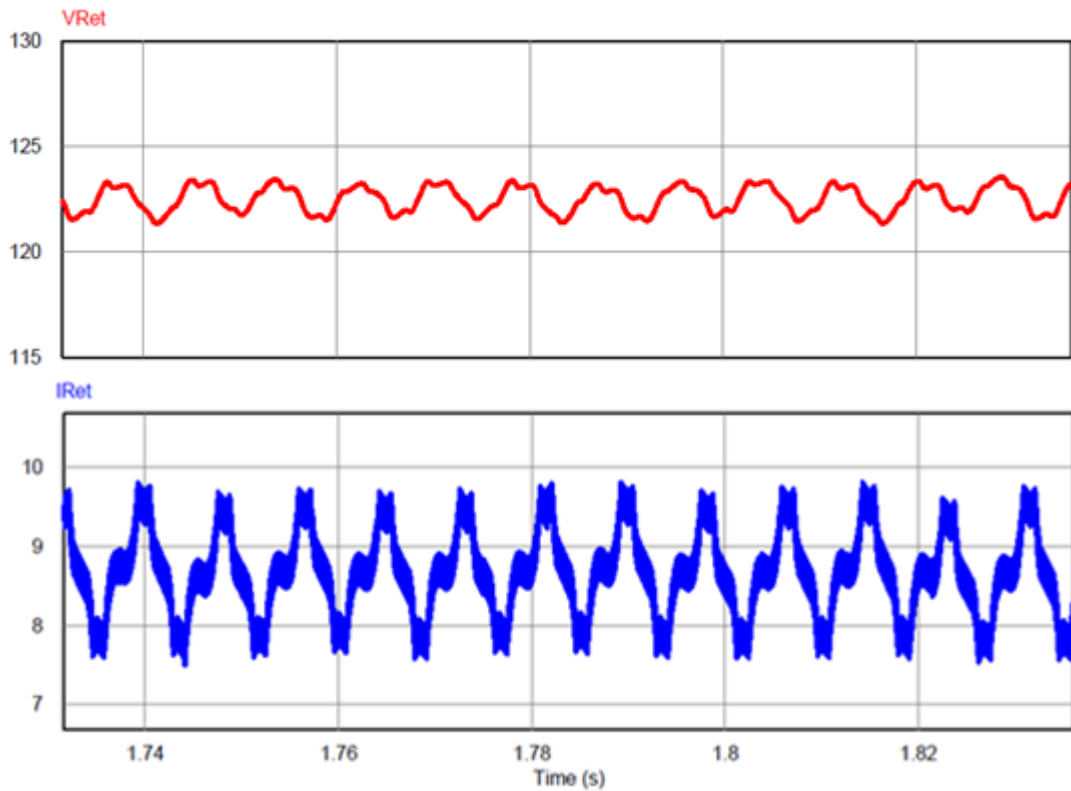
Fonte: autor.

Figura 44 – Formas de onda dos esforços nos componentes da ponte Greutz.



Fonte: autor.

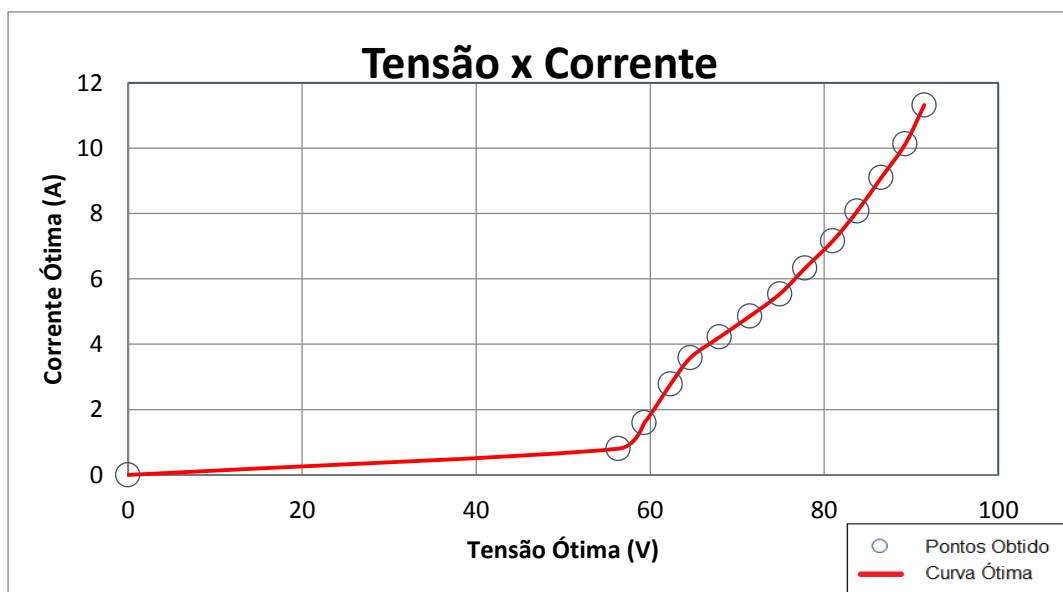
Figura 44 – Formas de onda dos esforços nos componentes da ponte Greatz (continuação).



Fonte: autor.

Na figura 45 consta a curva de Corrente x Tensão ótimas para o aerogerador simulado. A curva foi utilizada como referência para comparação com os resultados obtidos com o MPPT.

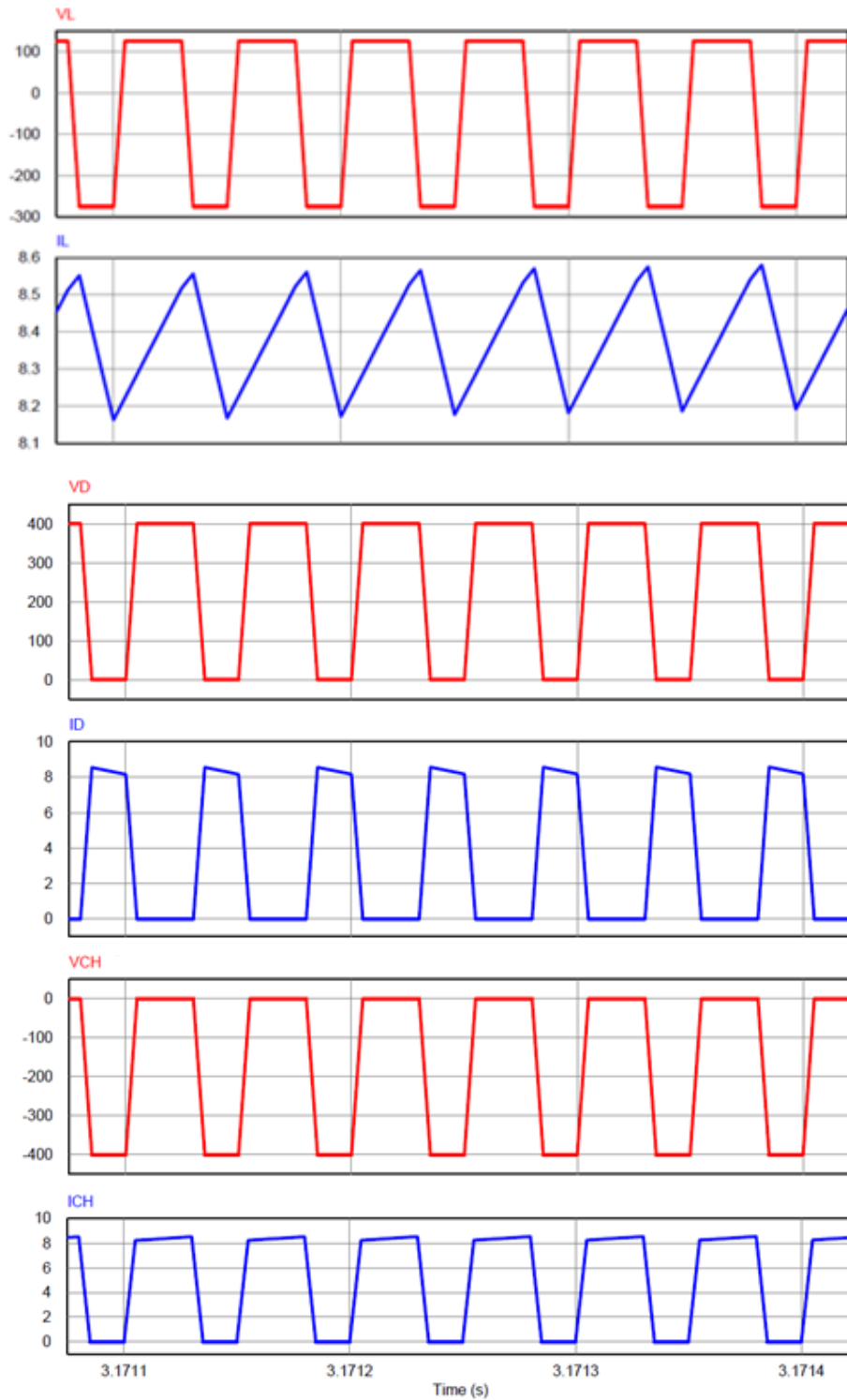
Figura 45 – Curva de Corrente x Tensão ótima do sistema.



Fonte: autor.

Os esforços da tensão e corrente dos componentes constituintes do conversor boost são apresentados na figura 46.

Figura 46– Formas de onda dos esforços nos componentes do conversor Boost.



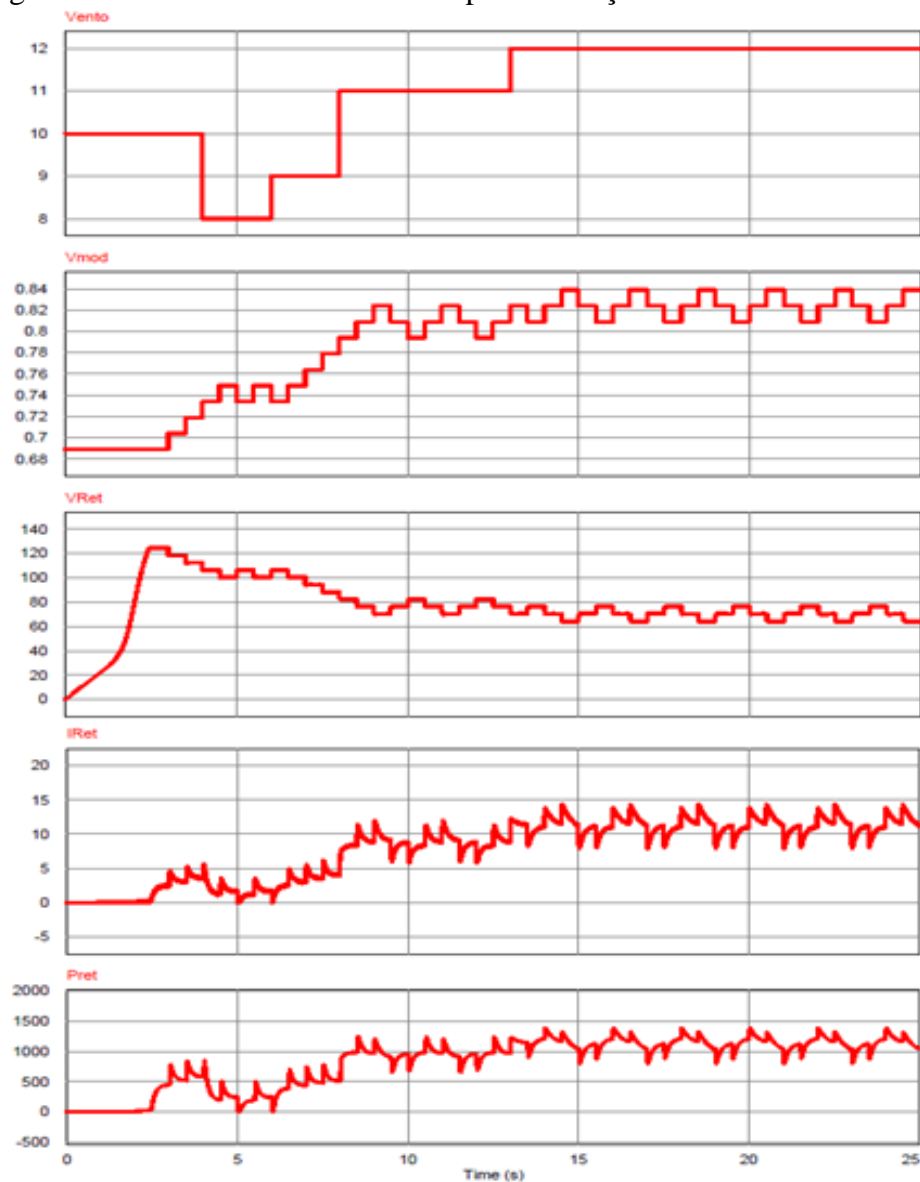
Fonte: autor.

Os Valores máximos da tensão do indutor são 125,22 V e -275,85 V, enquanto a corrente máxima no indutor resultou em 8,54 A e a média foi 8,36 A.

A corrente média que foi obtida no diodo foi de 4,12 A, enquanto a corrente eficaz no interruptor foi de 6,76 A. É importante ressaltar que os valores obtidos nessa simulação se diferenciaram dos valores obtidos nas seções 5.3 e 5.4, isso se deve a aplicabilidade do rastreamento do ponto de máxima potência.

Para comprovar a eficiência do MPPT foram aplicados alguns degraus na velocidade do vento, isso para simular variações de velocidade que comumente acontecem, com isso é possível notar se o algoritmo está variando a razão cíclica de acordo os dados lidos para aquele instante. Na figura 47 estão representadas as formas de onda no vento, da razão cíclica, da tensão retificada, da corrente no indutor e, por último, da potência processada pelo sistema.

Figura 47 – Formas de onda obtidas após a variação da velocidade do vento.



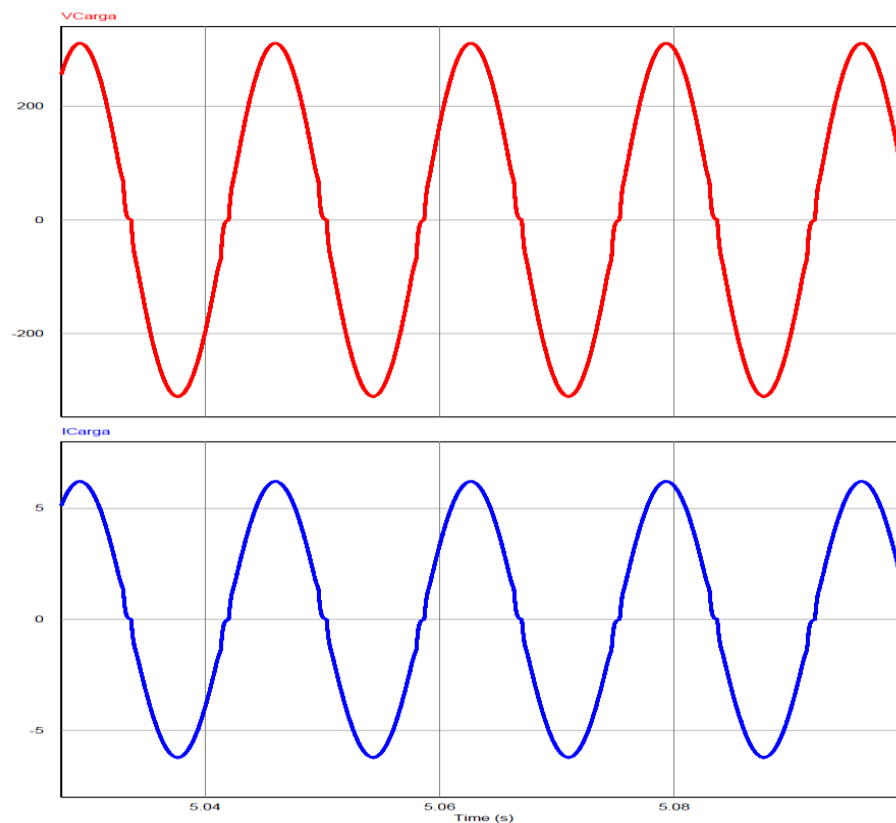
Fonte: autor.



Pode-se observar na figura 45 que ao variar a velocidade do vento a razão cíclica também sofre variações, como isso o algoritmo tenta fazer com que o sistema sempre processe a máxima potência para aquele instante, o que é observado nas formas de onda da tensão, da corrente e, principalmente da potência na figura mencionada. A aplicação do MPPT com o algoritmo perturbe e observe trouxe maior eficiência para este sistema de geração.

Por fim, a tensão e corrente fornecida na saída do inversor, ou seja, na carga, é apresentada na figura 48, a qual mostra que o sistema comportou-se como como descrito na literatura, fornecendo energia CA a uma carga que é interligada a rede da concessionária.

Figura 48– Formas de onda da tensão e corrente alternada na carga.



Fonte: autor.

## 5.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por objetivo apresentar os resultados obtidos com o estudo de um sistema eólico de pequeno porte com enfoque nos métodos de rastreamento do ponto de máxima potência.

Inicialmente foram apresentados os modelos de projeto utilizados durante a simulação e em seguida houve a análise de todos os processos, desde a geração de energia até a entrega ao ponto de consumo.

As características do sistema de geração utilizado foram obtidas através do fabricante, ENERSUD, e em cima dos parâmetros fornecidos houve a simulação de tal componente em que seu funcionamento se deu como descrito nas especificações.

Foi levantada a curva de potência do aerogerador utilizado, o qual através da mesma é possível saber qual o potencial de geração de energia para cada dado de velocidade do vento.

Em seguida, abordou-se o processo de retificação do sinal do gerador e, utilizando as equações descritas na literatura foram obtidos todos os parâmetros deste componente e seu funcionamento se deu de forma eficiente, tendo resultados semelhantes aos dados calculados.

Após o processo de retificação houve a conversão da tensão através do conversor elevador Boost, em que a tensão obtida com a retificação foi elevada para que fosse entregue ao processo de inversão uma tensão de 400 V e assim, fornecer a demanda uma potência com os parâmetros condizentes aos da concessionária. É importante ressaltar que o funcionamento do inversor nesta aplicação, foi tratado somente de forma teórica e, para a obtenção de suas formas de onda, a simulação do mesmo foi feita separadamente.

Foi no processo de conversão de energia que se deu a implementação dos MPPT's estudados, sendo que os modelos simulados conseguiram operar o sistema eficientemente para a condição de simulação, porém o modelo que mais se adequa a implementação do sistema é o MPPT através do algoritmo P&O, o qual obteve melhores resultados para esta aplicação.

Diante do exposto, todo o sistema funcionou conforme calculado e os dados obtidos com a simulação foram bem próximos aos dados calculados.

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho, foi apresentado um estudo acerca da implementação de um MPPT em um aerogerador de pequeno porte, em que foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os principais conceitos de como se dá a conversão da energia fornecida pelos ventos em energia elétrica, além de todo o processamento da energia desde o ponto de geração, até a entrega da energia no ponto de consumo. Também foi apresentado a evolução histórica das turbinas eólicas, desde seu surgimento até o grande advento da energia eólica atual.

Para realizar o estudo contido neste trabalho, utilizou-se primeiramente das metodologias e equacionamentos presentes na literatura e, assim, foi possível dimensionar o sistema de geração e estimar a produção de energia gerada a partir de um aerogerador que já tem aplicação comercial. O dimensionamento foi realizado inicialmente com a investigação da velocidade do vento em um local de aplicação, o local foi à cidade de Fortaleza – CE, que segundo as pesquisas realizadas, possui média de velocidade do vento na ordem de 5,71 m/s, com isso houve a conversão dessa velocidade para a altura de instalação do aerogerador, 45 m, dessa forma a nova velocidade média obtida foi de 10,42 m/s, velocidade esta que promete geração de energia por parte de seu sistema de geração durante todo o período de disponibilidade do vento, já que o mesmo possui velocidade de partida na ordem 2,2 m/s, porém com a obtenção da curva de potência do aerogerado, notou-se que o mesmo só inicia a geração de energia a partir de uma velocidade de 6 m/s.

Ao estimar a potência fornecida pelo vento para uma área de 4,75 m<sup>2</sup> que é a área coberta pelas pás, foi obtido uma potência de 3184 W, mas como a potência nominal do aerogerador é de 1000 W, pôde-se calcular a eficiência na conversão, que resultou em um sistema que aproveita 31,4% da potência disponível pelo vento.

A potência gerada através do aerogerador foi processada utilizando os circuitos da eletrônica de potência. O primeiro circuito a ser estudado e dimensionado foi o retificador, que recebeu as três fases do aerogerador e retificou a tensão para a entrada CC do conversor Boost, por consequência, este foi o segundo circuito a ser estudado e dimensionado, foi nele que houve a implementação do MPPT, que se mostrou eficiente durante as simulações. Seguindo a sequência do processo, o inversor foi o último a ser dimensionado e transformou a tensão em CC proveniente do Boost para CA.

Foram comparados os resultados obtidos com a modulação por Razão Cíclica Fixa com os do algoritmo Perturbe&Observe. Ao final, o algoritmo P&O mostrou-se 13% mais eficiente no fornecimento de energia a carga, mostrando-se eficiente na busca pelo o ponto

de máxima potência e sempre fornecendo a carga a máxima potência disponível para a velocidade do vento naquele instante.

Por fim, todo o sistema aqui dimensionado mostrou-se eficiente em atender uma determinada carga, obtendo satisfatório aproveitamento no fornecimento de energia, não se distanciando dos dados calculados através do equacionamento. Com isso, a utilização de sistemas eólicos para geração de energia em pequeno porte vem configurando-se, cada vez mais, como um ótimo investimento, pois além de proporcionar a autoprodução esse sistema agrega valor econômico para o local de instalação.

Como proposta para investigações futuras, têm-se a implementação de um sistema de controle no sistema eólico desenvolvido neste trabalho, consistindo, principalmente, em: controle de injeção de potência (ativa e reativa na rede elétrica), controle do barramento capacitivo do inversor, controle de frenagem da turbina e controle do fator de potência da turbina. Além disso, espera-se implementar outras técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência e assim obter uma análise comparativa de eficiência entre os métodos. Há de se realizar um estudo sobre a filtragem dos sinais para que as perdas ao longo do processamento de energia sejam minimizadas, além de realizar uma investigação acerca da viabilidade econômica de implementação do sistema de geração de pequeno porte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 LOPEZ, R. A. Energia Eólica. São Paulo: Artliber, 2012.
- 2 TIBOLA, G. Sistema Eólico de Pequeno Porte para Geração de Energia com Rastreamento de Máxima Potência. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- 3 ENERGY, B. BP ENERGY OUTLOOK. GRUPO BP BRASIL. [S.l.], p. 2. 2017.
- 4 GIANNINI, M.; DUTRA, R. M.; GUEDES, V. G. Estudo Propectivo do Mercado de Energia Eólica de Pequeno Porte no Brasil. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), 2013.
- 5 EPE. Balanço Energético Nacional 2017 - Relatório Síntese - Ano base 2016. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.
- 6 FILHO, H. M. D. O. Conversor Estático de Três estágios para Carregamento de Baterias a Partir de Sistemas Eólicos. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2010.
- 7 FADIGAS, E. A. F. A. Energia Eólica. Barueri: Monole, 2011.
- 8 DUTRA, R. M. Energia Eólica: Princípios e Tecnologia. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2008. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/downloads/energia-eolica-principios-tecnologias.pdf>>. Acesso em: 11 novembro 2016.
- 9 ABEEÓLICA. Boletim de Dados: Novembro de 2016. São Paulo: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>>. Acesso em: 29 novembro 2016.
- 10 TERCIOTE, R. Eficiência Energética de um Sistema Eólico Isolado. Campinas: [s.n.], 2002. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100056&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100056&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 16 novembro 2016. Encontro de Energia no Meio Rural 4.
- 11 ABEEÓLICA. São Paulo: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://portalabeeolica.org.br>>. Acesso em: 4 outubro 2017.
- 12 ABEEÓLICA. Nosso Setor. [S.l.]: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>>. Acesso em: 2016 novembro 2016.
- 13 AMBIENTE ENERGIA. Aneel Aumenta Incentivo em Autogeração de Energia. [S.l.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/05/aneel-aumenta-incentivos-em-autogeracao-de-energia/26175>>. Acesso em: 30 novembro 2016.
- 14 ANEEL, B. Aneel Amplia Possibilidades para Microgeração Distribuída. [S.l.]: [s.n.], 2016. Disponível em:

<[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=8955&id\\_area=90](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90)>. Acesso em: 30 novembro 2016.

- 15 FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; UMANS, S. D. Máquinas Elétricas. 6. ed. Bookman: [s.n.], 2006.
- 16 ARRABAÇA, D. A.; GIMENEZ, S. P. Eletrônica de Potência: Conversores de Energia CA/CC: Teoria, Prática e Simulação. São Paulo: Érica, v. 2, 2011.
- 17 BARBI, I. Eletrônica de Potência. 6. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2006.
- 18 HART, D. W. Eletrônica de Potência: Análise de Projeto de Circuitos. Porto alegre: Amgh Editora Ltda, 2012.
- 19 AHMED, A. Eletrônica de Potência. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.
- 20 GASPAR, J. F. P. Gerador Sincrono de Imanes Permanentes para Microgeração Eólica: Dimensionamento, Construção e Ensaio. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2013.
- 21 MACCARINI, M. C. Inversor Monofásico Sincronizado para a Conrção de um Gerador Eólico à Rede Elétrica: Estudo, Projeto e Implementação. Florianópolis: Unufersidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- 22 BARBI, I. Projeto de Inversor Monofásico. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 215. 2007.
- 23 COELHO, D. C. Proposta de Conversor para Rastreamento da Máxima Potência de Pequenos Sistemas de Geração de Energia Elétrica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- 24 SOUZA, Y. R. D. Estudo do rastreamento do Ponto de Máxima Potência - MPPT - Em Sistemas de Geração Fotovoltaica. Brasília: Universidade de Brasília, 2017.
- 25 MOÇAMBIQUE, N. E. M. Aplicação de Algoritmo de Busca do Ponto de Máxima Potência e Controladores Lineares e/ou Fuzzy para a Regulação da Tensão Terminal de Paineis Fotovoltaicos. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2012.
- 26 LIMA, G. B.; AL, E. Implementação de Técnicas de MPPT em Sistemas Fotovoltaicos Utilizando uma Plataforma Computacional. Uberaba: Universidade Federal do Triângulo Mineiro, 2014.

## BIBLIOGRAFIA

ABEEÓLICA. 10 GW: EÓLICA, a Energia do Futuro. São Paulo: Abeeólica, 2016. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/materiais-tecnicos/2-uncategorised/5456-infoográfico-abeeólica---10-gw.html>>. Acesso em: 30 nov. 2016

BIOSERVE ENERSUD (Esteio - Rio Grande do Sul - Brasil). TURBINA EÓLICA - GERAR 246 – 1KW. 2017. Disponível em: <<http://www.bioserve.com.br/>>. Acesso em: 03 mar. 2017.

BORGAMOTO, Devis. Análise Modelagem e Controle de Retificadores PWM Trifásicos. 2005. 274 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

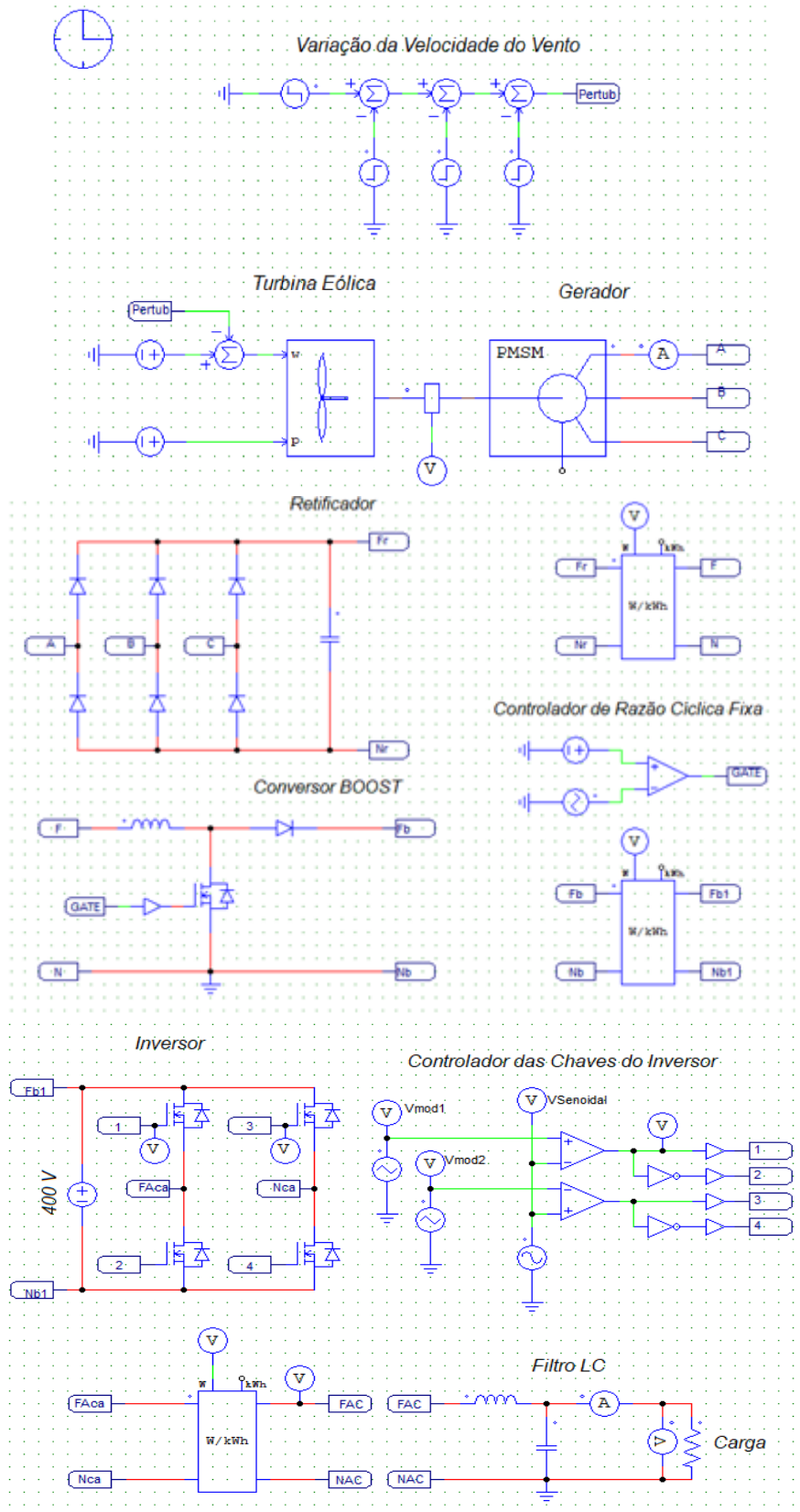
FRANCISCO, Carlos Manuel Mendes. GreenEnergy - Produção de Energia Elétrica a Partir de Fontes de Energia Renovável para Sistemas de Microprodução. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade da Madeira, Funchal, 2012.

MARTINS, Denizar Cruz; BARBI, Ivo. Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos não Isolados. 2. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2006.

METEOROLOGIA, Instituto Nacional de. Estações e Dados. 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 24 nov. 2017.

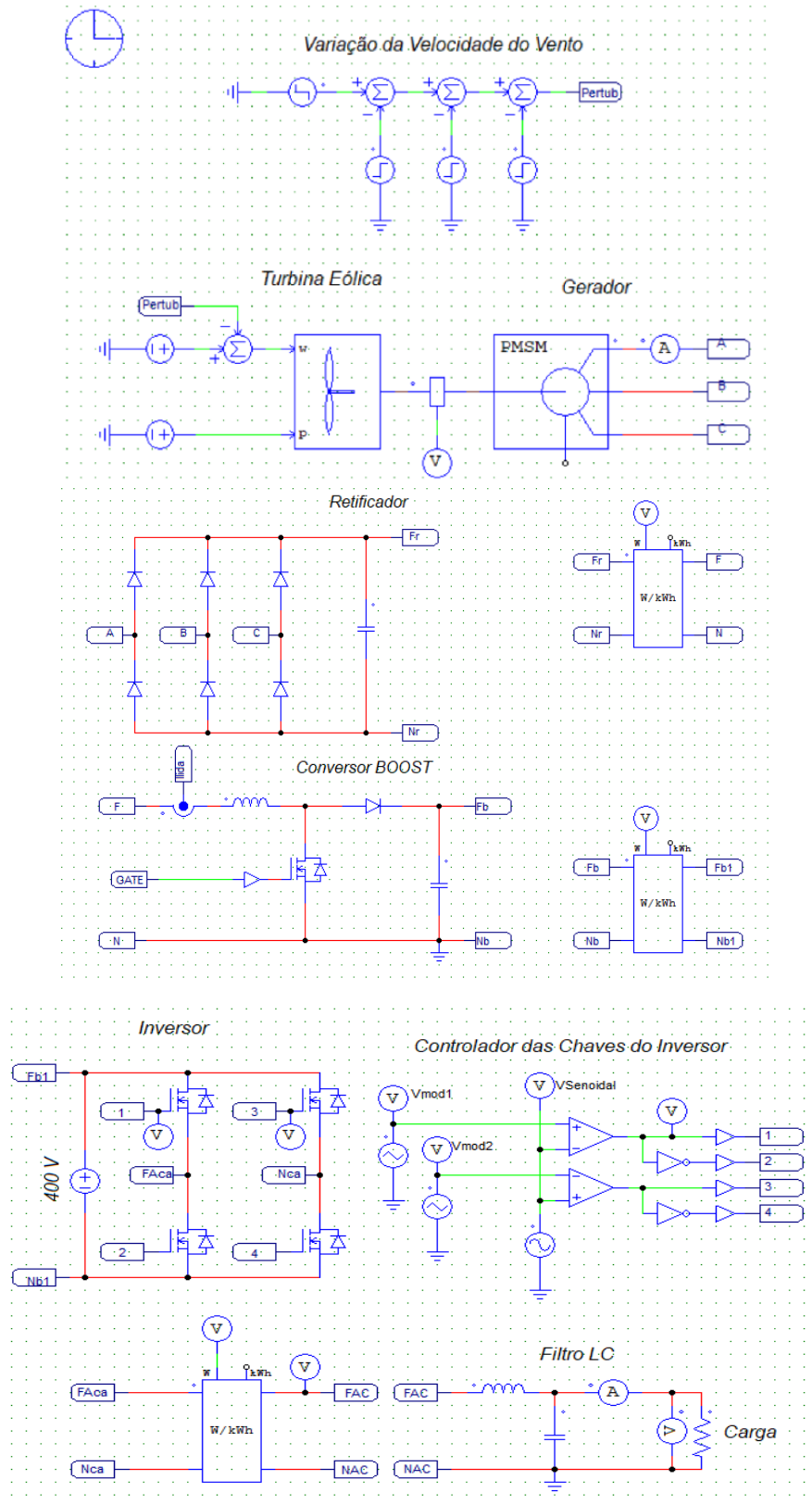
POMILIO, José Antenor. Pré-Reguladores de Fator de Potência. Campinas: Unicamp, 2016.

## APÊNDICE A - MODELO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA O MPPT DE RAZÃO CÍCLIA FIXA

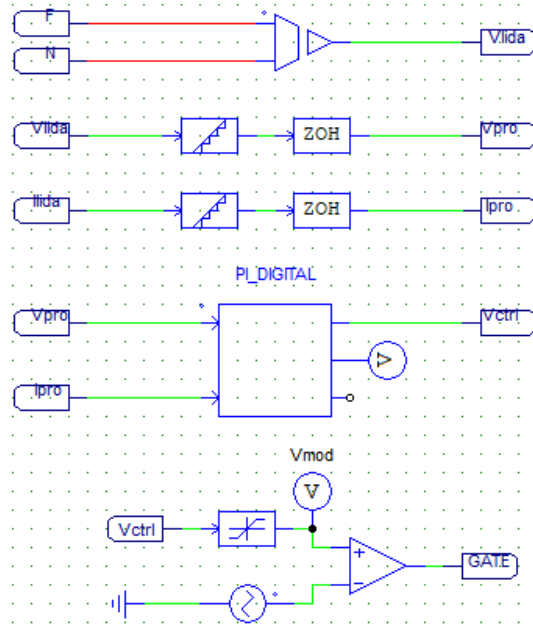




## APÊNDICE B - MODELO DO UTILIZADO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ESTUDO DO MPPT ATRAVÉS DO ALGORITMO P&O



### MPPT Perturbe & Observe



## APÊNDICE C - ALGORITMO DO MPPT

```

//*****Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro Brasileira*****//
//*
Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável - IEDS
Curso de Engenharia de Energias

Tema da monografia: Estudo de um Aerogerador de Pequeno Porte Conectado à Rede
                    Com Aplicação do Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
Algoritmo Perturbe & Observe (P&O)
Programador: Raimundo Isaquiel de Oliveira Ramos – Graduando em Engenharia de
Energias
**

//*****Definição das Variáveis*****//
static double Potencia_lida, D=0.689, D1dt, Vi, li;

static double dt, Pn1=0, Vn1=0;

//*****Definição das Referência*****//

Vi=x1;
li=x2;
dt=0.015;

//*****Função Principal*****//

Potencia_lida = (Vi * li); // Cálculo da potência lida

if(Potencia_lida > Pn1)
{
    D1dt=D+dt;
}
else
{
    D1dt=D-dt;
}

if(D1dt >=0.95)
{
    D1dt =D-dt;
}

if(D1dt < 0)
{

```

```
        D1dt =D+dt;
    }

    Pn1=Potencia_lida;
    D=D1dt;
    y1=D1dt;
    y2=Pn1;
//*****FIM*****//
```

**ANEXO A - VELOCIDADES MÉDIAS DO VENTO**

Ano	Mês	Velocidade do Vento (m/s)
2010	Janeiro	6,00
	Fevereiro	5,80
	Março	5,10
	Abril	5,60
	Maio	6,60
	Junho	5,00
	Julho	5,00
	Agosto	6,30
	Setembro	7,00
	Outubro	6,10
	Novembro	5,80
	Dezembro	5,10
2011	Janeiro	5,80
	Fevereiro	5,14
	Março	5,00
	Abril	3,80
	Maio	5,00
	Junho	5,00
	Julho	5,00
	Agosto	6,60
	Setembro	6,00
	Outubro	6,10
	Novembro	5,00
	Dezembro	6,60
2012	Janeiro	6,60
	Fevereiro	6,00
	Março	5,00
	Abril	5,00
	Maio	5,50
	Junho	5,60
	Julho	5,00
	Agosto	6,60
	Setembro	6,30
	Outubro	6,00
	Novembro	5,30
	Dezembro	6,10
2013	Janeiro	6,10
	Fevereiro	6,30
	Março	5,60
	Abril	4,80

	Maio	8,80
	Junho	4,80
	Julho	4,60
	Agosto	6,00
	Setembro	5,80
	Outubro	5,80
	Novembro	6,50
	Dezembro	6,80
2014	Janeiro	6,50
	Fevereiro	4,50
	Março	5,00
	Abril	4,30
	Maio	4,80
	Junho	5,30
	Julho	5,50
	Agosto	6,30
	Setembro	6,60
	Outubro	8,50
	Novembro	5,50
	Dezembro	5,50
2015	Janeiro	6,00
	Fevereiro	5,80
	Março	5,00
	Abril	5,30
	Maio	5,00
	Junho	6,00
	Julho	5,00
	Agosto	6,60
	Setembro	6,60
	Outubro	6,30
	Novembro	5,14
	Dezembro	6,17
2016	Janeiro	4,60
	Fevereiro	5,00
	Março	6,69
	Abril	5,66
	Maio	5,14
	Junho	5,66
	Julho	5,14
	Agosto	6,69
	Setembro	6,17
	Outubro	8,23
	Novembro	7,20

	Dezembro	5,14
2017	Janeiro	5,14
	Fevereiro	4,63
	Março	4,12
	Abril	4,63
	Maio	4,63
	Junho	4,63
	Julho	5,14
	Agosto	7,72
	Setembro	6,17