

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO EMULADOR
DE UMA TURBINA EÓLICA**

DIEGO LUIZ MONTEIRO COSTA

Uberlândia

2019

DIEGO LUIZ MONTEIRO COSTA

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO EMULADOR
DE UMA TURBINA EÓLICA**

Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal de Uberlândia – Núcleo de Pesquisas em Eletrônica de Potência (NUPEP), perante a banca de examinadores como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Ciências.

Área de concentração: Energias Renováveis.
Orientador: Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas.
Co-Orientador: Dr. Gustavo Brito de Lima.

Banca Examinadora:

Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas (UFU)

Dr. Gustavo Brito de Lima (UFU)

Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende (UFU)

Dr. Danilo Borges Rodrigues (UFTM)

A Bolsa de Estudos para esta pesquisa foi concedida pela CAPES - Brasil.

Uberlândia

2019

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C837 2019	<p>Costa, Diego Luiz Monteiro, 1991- Estudo e implementação de um protótipo emulador de uma turbina eólica [recurso eletrônico] / Diego Luiz Monteiro Costa. - 2019.</p> <p>Orientador: Luiz Carlos Gomes de Freitas. Coorientador: Gustavo Brito de Lima. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di. 2019.2083 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Gomes de Freitas, Luiz Carlos, 1976-, (Orient.). II. Brito de Lima, Gustavo, 1986-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.</p> <p>CDU: 621.3</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

DIEGO LUIZ MONTEIRO COSTA

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO EMULADOR DE
UMA TURBINA EÓLICA**

Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal de Uberlândia – Núcleo de Pesquisas em Eletrônica de Potência (NUPEP), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Ciências.

Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas
Orientador

Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior
Coordenador da Pós-Graduação

Uberlândia
2019

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Elcione e Erenicia,
ao meu irmão Elcione Junior,
à minha avó materna Neli,
à minha noiva Bruna,
à toda minha família e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre ao meu lado me guiando e me colocando no caminho certo, fugindo dos grandes perigos, no intuito de me orientar no caminho que se encontram meus objetivos de vida tanto pessoal quanto profissional.

Agradeço aos meus pais, Elcione e Erenicia, ao meu irmão Elcione Junior e a minha avó Neli, que independentemente da situação nunca mediram esforços para me apoiar na busca pelos meus sonhos, me aconselhando e dando forças para que eu pudesse sempre continuar a minha jornada de vida. Reconheço todo esforço feito pela minha família em prol da minha educação, sempre com compreensão, carinho e amor almejando sempre o melhor para mim em cada situação.

Agradeço a minha noiva Bruna que está sempre do meu lado, mesmo nas situações mais adversas sempre me apoiou. Obrigado por todo amor, companheirismo e paciência em todos os momentos que tive que me ausentar para dedicação aos meus estudos. Também agradeço por todo apoio vindo da sua família, principalmente seus pais, Luiz Roberto e Marlene, que sempre acreditaram em mim, me incentivando a alcançar meus objetivos.

Aos meus familiares que mesmo distantes torceram e forneceram todo suporte disponível para que eu pudesse ir cada vez mais ao alcance dos meus sonhos.

Aos professores, colaboradores e orientadores, Luiz Carlos Gomes de Freitas, Gustavo Brito de Lima e Danilo Borges Rodrigues, pela confiança depositada e pela contribuição e conselhos fornecidos durante todo trabalho.

Aos meus amigos de laboratório Gustavo, Bárbara, Joaquim, Mateus, Júlio, Lucas, Claudio, Paulo, Ana Caroline, Augusto, Aline, Henrique, Antônio, Fernando, Rodrigo, muito obrigado pela convivência, conselhos e ensinamentos os quais carregarei sempre comigo.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior pelo suporte financeiro durante toda a pesquisa.

A todos que de uma forma direta ou indireta colaboraram com minha formação acadêmica, tanto pessoal quanto profissional, o meu muito obrigado.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”.

Theodore Roosevelt

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a análise e implementação de um emulador de turbina eólica em pequena escala. O sistema é composto por um conjunto motor-gerador, que tem a função de emular o sistema eólico, um retificador e um conversor *Boost*, estes responsáveis pela extração de energia do grupo motor-gerador. Para emulação da turbina eólica utilizou-se um motor CC (corrente contínua) acoplada a um gerador síncrono trifásico. Um *Chopper* CC-CC foi utilizado para controlar a rotação do motor CC, possibilitando acionar o gerador síncrono de acordo com diferentes perfis de vento, emulando uma turbina eólica. O retificador trifásico tem a função de retificar as tensões de saída do gerador síncrono e o conversor *Boost* (conectado em cascata com o retificador) é responsável por controlar a potência extraída do grupo motor-gerador. A técnica MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) utilizada para extração de potência que melhor atendeu as características do sistema foi a P&O (Perturbe e Observe) clássico. Com a extração da máxima potência do conjunto foi possível alimentar um barramento CC que poderá ser utilizado em diversas aplicações.

Palavras Chaves: Emulador de uma Turbina Eólica, Motor CC, Máquina Síncrona, Retificador Trifásico, Conversor Boost.

ABSTRACT

The present work aims to analyze a wind turbine emulator in a laboratory scale. The purpose of this system was to reproduce on a small scale the disturbances suffered in the generation of wind energy and to analyze in a detailed way these phenomena. In order to the system recognizes the main parameters derived from the wind force caused by the wind turbine, a properly controlled DC (direct current) motor was used, emulating what actually occurs in the wind energy generation system. The properly controlled wind disturbances were noticed at the speed of rotation of the DC motor axis. The generation of electric energy was made by using a three-phase synchronous machine, in the configuration of a generator, which provided the power variations delivered by the motor in the form of alternating voltages and currents. In order to control these voltages and currents provided by the synchronous machine, a three-phase rectifier was built with the objective of transforming the alternating electric quantities to continuous. Allocated the rectifier in series with the synchronous machine was built a DC-DC Boost converter in order to control the power generated by the system. The Boost converter was properly controlled and a Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique was implemented. The MPPT technique that best met the characteristics of the system was the technique of P&O (Perturb and Observe) classic. With the extraction of maximum power made in the system, this energy was delivered to a DC busbar that could be used in several applications.

Keywords: Emulator of a Wind Turbine, DC Motor, Synchronous Machine, Three Phase Rectifier, Boost Converter.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - CAPACIDADE E CRESCIMENTO GLOBAL DA ENERGIA EÓLICA NOS ANOS DE 2005 E 2024.....	19
FIGURA 1.2 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA ATUALIZADA EM FEVEREIRO DE 2019... 20	
FIGURA 2.1 – SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA.	25
FIGURA 2.2 – TURBINA EÓLICA COM VELOCIDADE FIXA.	26
FIGURA 2.3 – TURBINA EÓLICA COM DEFIG DE VELOCIDADE VARIÁVEL.....	27
FIGURA 2.4 – TURBINA COM PMSG DE VELOCIDADE VARIÁVEL.	28
FIGURA 2.5 – DIAGRAMA DE UM SISTEMA DE MPPT COM TABELA DE BUSCAS.....	31
FIGURA 2.6 – GRÁFICO GENERALIZANDO O PRINCÍPIO DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA.....	32
FIGURA 2.7 – C_p EM RELAÇÃO AO TSR PARA DIVERSAS VELOCIDADE DE VENTO E DE ROTAÇÃO DA TURBINA.....	33
FIGURA 2.8 – ESTRUTURA DO SISTEMA EÓLICO CONSTITUÍDO POR UM MOTOR CC CONECTADO A UMA MÁQUINA SÍNCRONA COM SEU SISTEMA DE CONTROLE.	34
FIGURA 3.1 – TOPOLOGIA BÁSICA DE UM MOTOR CC.	37
FIGURA 3.2 – DIAGRAMA DE BLOCOS RELACIONANDO VELOCIDADE E CORRENTE NA ARMADURA.....	38
FIGURA 3.3 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO MOTOR CC COM ENTRADA DE TENSÃO E SAÍDA COMO VELOCIDADE.	39
FIGURA 3.4 – CURVA DE DESACELERAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR GERADOR.....	41
FIGURA 3.5 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO MOTOR CC SEM CONTROLE.....	42
FIGURA 3.6 – CONVERSOR CLÁSSICO CC-CC <i>Boost</i>	44
FIGURA 3.7 – MÁQUINA SÍNCRONA EM SÉRIE COM RETIFICADOR E CONVERSOR <i>Boost</i> . .	47
FIGURA 3.8 – ESQUEMÁTICO DO CONVERSOR <i>Boost</i> MODELADO.	47
FIGURA 3.9 – PRIMEIRA ETAPA DE ATUAÇÃO DO CONVERSOR <i>Boost</i>	48
FIGURA 3.10 – SEGUNDA ETAPA DE ATUAÇÃO DO CONVERSOR <i>Boost</i>	49
FIGURA 4.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS QUE REPRESENTA O CONTROLE DO MOTOR CC.....	55
FIGURA 4.2 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES E OS DIAGRAMAS DE BODE DO MOTOR NÃO CONTROLADO.	56
FIGURA 4.3 – RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO DO MOTOR CC SEM COMPENSADOR.	57
FIGURA 4.4 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES E OS DIAGRAMAS DE BODE DO MOTOR COM COMPENSADOR.	58

FIGURA 4.5 – RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO COM COMPENSADOR.	58
FIGURA 4.6 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO MPPT P&O UTILIZADO.	60
FIGURA 4.7 – GRÁFICO INFORMANDO VALORES MÍNIMO E MÁXIMO DE UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE.....	62
FIGURA 4.8 – POTÊNCIA ELÉTRICA E MECÂNICA EM RELAÇÃO A CORRENTE DE SAÍDA.....	63
FIGURA 4.9 – DIAGRAMA DE BLOCOS REPRESENTANDO O CONTROLE DE CORRENTE DE ENTRADA.	64
FIGURA 4.10 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES E OS DIAGRAMAS DE BODE DA PLANTA NÃO CONTROLADA.	64
FIGURA 4.11 – RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO DO SISTEMA NÃO CONTROLADO.....	65
FIGURA 4.12 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES E OS DIAGRAMAS DE BODE COM COMPENSADOR NO SISTEMA.....	66
FIGURA 4.13 – RESPOSTA DO SISTEMA COM COMPENSADOR AO DEGRAU UNITÁRIO.	67
FIGURA 5.1 – CIRCUITO DE POTÊNCIA E DIAGRAMA DE CONTROLE NA PLATAFORMA COMPUTACIONAL MATLAB®.....	69
FIGURA 5.2 – COMPONENTE RAJADA DO VENTO.	71
FIGURA 5.3 – COMPONENTE RAMPA DO VENTO.	72
FIGURA 5.4 – MODELO DO MOTOR CC UTILIZADO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO.....	73
FIGURA 5.5 – VELOCIDADE DE ROTAÇÃO CONTROLADA DO MOTOR CC.....	74
FIGURA 5.6 – MOTOR EMULANDO AS COMPONENTES DO VENTO.....	75
FIGURA 5.7 – TENSÃO GERADA ENTRE DUAS FASES DA MÁQUINA SÍNCRONA.	76
FIGURA 5.8 – CORRENTE GERADA EM UMA DAS FASES DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	76
FIGURA 5.9 – NÍVEL DE TENSÃO NA SAÍDA DO RETIFICADOR TRIFÁSICO.	77
FIGURA 5.10 – CONVERSOR <i>BOOST</i> E SEU CONTROLE.	78
FIGURA 5.11 – RESPOSTA DO CONTROLE ESTIPULADO NO CONVERSOR <i>BOOST</i>	79
FIGURA 5.12 – TENSÃO NA SAÍDA DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	79
FIGURA 5.13 – SISTEMA COMPLETO MONTADO.....	80
FIGURA 5.14 – PROTÓTIPO EMULADOR EÓLICO CONSTRUÍDO.	81
FIGURA 5.15 – CIRCUITO DA PONTE H.....	82
FIGURA 5.16 – CIRCUITO DO <i>CHOPPER</i> UTILIZADO.....	83
FIGURA 5.17 – COMPONENTE CONSTANTE DO VENTO VISTO PELO MOTOR.....	87
FIGURA 5.18 – COMPONENTE RAJADA DO VENTO VISTO PELO MOTOR.	88
FIGURA 5.19 – COMPONENTE RAMPA DO VENTO VISTO PELO MOTOR.	88
FIGURA 5.20 – COMPONENTES CONSTANTE, RAJADA E RAMPA VISTOS PELO MOTOR.	89

FIGURA 5.21 – TENSÃO VISTA NA ARMADURA DO MOTOR CC.	90
FIGURA 5.22– TENSÃO NO CIRCUITO DE CAMPO DO MOTOR CC.	91
FIGURA 5.23 – TENSÕES TRIFÁSICAS NA SAÍDA DA MÁQUINA SÍNCRONA.	92
FIGURA 5.24 – CORRENTES TRIFÁSICAS NA SAÍDA DA MÁQUINA SÍNCRONA.	92
FIGURA 5.25 – ONDAS DE TENSÃO E CORRENTE NA SAÍDA DO RETIFICADOR TRIFÁSICO. .	94
FIGURA 5.26 – TENSÃO E CORRENTE NA ENTRADA DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	95
FIGURA B.1 – CIRCUITO PARA CONVERSÃO DE 0 – 5V PARA 0 – 3,3V.	115
FIGURA B.2 – <i>ENCODER</i> COM ACOPLAMENTO DE MOLA UTILIZADO.	115
FIGURA B.3 – <i>ENCODER</i> COM ACOPLAMENTO SEM MOLA UTILIZADO.....	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS TURBINAS DE VELOCIDADE FIXA E VARIÁVEL.	22
TABELA 2.1 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TURBINAS DE VELOCIDADE FIXA E VARIÁVEL.	29
TABELA 3.1 – ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR CC UTILIZADO.	43
TABELA 3.2 – ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR TRIFÁSICO UTILIZADO	43
TABELA 3.3 – PARÂMETROS DO PROJETO DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	45
TABELA 5.1 – PARÂMETROS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS NO PROTÓTIPO.	81
TABELA 5.2 – PLACA DO <i>GATE DRIVER SIMPLES</i>	83
TABELA 5.3 – PLACA DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO <i>GATE DRIVER</i>	84
TABELA 5.4 – PLACA DSP TMS320F28335 DA <i>TEXAS INSTRUMENTS</i> [®]	84
TABELA 5.5 – ESPECIFICAÇÕES DA PLACA DE CONVERSÃO DE SINAIS DE 3,3 V PARA 15 V.	85
TABELA 5.6 – MÓDULO PARA AQUISIÇÃO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Ampère, unidade de corrente elétrica
A/D	Conversor analógico / digital
Amed	Matriz de sistema média
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Bmed	Matriz de entrada média
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
Cint	Capacitor de entrada do conversor CC-CC <i>Boost</i>
CVpv(s)	Função de transferência do compensador de tensão do conversor
D	Diodo do conversor
Dinicial	Razão cíclica na condição inicial do escaneamento
Dfinal	Razão cíclica na condição final do escaneamento
Dmp	Razão cíclica de máxima potência
DVoc	Razão cíclica de tensão de circuito aberto
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
fmppt	Frequência de atualização do algoritmo MPPT P&O
fs	Frequência de chaveamento
GMPP	<i>Global Maximum Power Point</i>
GPWM(s)	Função de transferência do modulador PWM
GVpv_D(s)	Função de transferência da tensão de entrada em relação à razão cíclica de chaveamento do conversor
Hv(s)	Função de transferência do sensor de tensão

Hz	Hertz, unidade de frequência
$i_L(t)$	Corrente no indutor do conversor
I_{max_in}	Corrente máxima de entrada do conversor
I_{mp}	Corrente de máxima potência
ISC	Corrente de curto-circuito
I-V	Curva corrente x tensão do sistema eólico
kHz	Kilohertz, unidade de frequência
kW	Kilowatt, unidade de potência ativa
L	Indutor do conversor
MCC	Modo de Condução Contínuo
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
mH	Milihenry, unidade de indutância
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
ms	Milissegundo, unidade de tempo
NUPEP	Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência
P&O	Perturbe e Observe
PID	Compensador Proporcional Integral Derivativo
PMP	Ponto de máxima potência
P-V	Curva potência x tensão do sistema eólico
PWM	<i>Pulse With Modulate</i>
RL	Resistência representativa das perdas no indutor do conversor
RS	Resistência representativa das perdas de condução do conversor
Ro	Impedância de saída da <i>string</i> para irradiância máxima

S	Interruptor do conversor
T_s	Período de chaveamento
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
$u(t)$	Vetor de entrada
V	Volt, unidade de tensão elétrica
VDB	Queda de tensão no diodo do conversor
V_o	Tensão do barramento CC
V_{max_in}	Tensão máxima de entrada do conversor
V_{mp}	Tensão de máxima potência
V_{ref}	Tensão de referência da técnica de MPPT P&O
$x(t)$	Vetor de estados
W	Watt, unidade de potência ativa
°C	Graus Celsius, unidade de temperatura
ΔD	Passo de razão cíclica no escaneamento
ΔI	Ondulação de corrente (%) no indutor do conversor
ΔV	Passo de perturbação da tensão
ΔV_{ret}	Ondulação de tensão (%) no capacitor do conversor
Ω	Ohm, unidade de resistência elétrica
μF	Microfarad, unidade de capacitância
μs	Microssegundo, unidade de tempo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2. ESTADO DA ARTE	25
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
2.2. TOPOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA.....	25
2.2.1. TIPOS DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA	26
2.3. RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT).....	30
2.3.1. TÉCNICAS DE MPPT PARA O SISTEMA EÓLICO	30
2.4. ESTRUTURA PROPOSTA NO TRABALHO	34
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
3. ESPECIFICAÇÕES, MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DO SISTEMA	36
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	36
3.2. DETERMINAÇÕES DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	36
3.2.1. ESPECIFICAÇÕES DOS PARÂMETROS DO MOTOR CC UTILIZADO.....	39
3.3. EXPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	43
3.4. ESPECIFICAÇÕES DO RETIFICADOR TRIFÁSICO UTILIZADO	44
3.5. DETERMINAÇÕES DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC BOOST	44
3.5.1. MODELAGEM DO CONVERSOR CC-CC BOOST	46
3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO SISTEMA	55
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
4.2. COMPENSADOR DE VELOCIDADE NO MOTOR CC.....	55
4.3. ESTRATÉGIA MPPT UTILIZADA NO CONVERSOR BOOST	59

4.4.	CARACTERÍSTICAS DE MÁXIMA POTÊNCIA EM UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE	61
4.5.	COMPENSADOR DE CORRENTE DO CONVERSOR BOOST.....	63
4.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5.	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS.....	68
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	68
5.2.	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA	68
5.2.1.	COMPONENTES DO VENTO	70
5.2.2.	MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	73
5.2.3.	MÁQUINA SÍNCRONA	75
5.2.4.	RETIFICADOR TRIFÁSICO.....	77
5.2.5.	CONVERSOR <i>BOOST</i>	78
5.3.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	80
5.3.1.	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO E SUAS ESPECIFICAÇÕES	80
5.3.2.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DAS COMPONENTES DO VENTO NO PROTÓTIPO	86
5.3.3.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL NA MÁQUINA CC	90
5.3.4.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO RETIFICADOR TRIFÁSICO	93
5.3.5.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONVERSOR BOOST	94
5.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
6.	CONCLUSÕES GERAIS.....	97
	REFERÊNCIAS	99
	PUBLICAÇÃO DOS AUTORES ASSOCIADOS À PESQUISA.....	102
	APÊNCIDE A – CÓDIGO EMBARCADO NO DSP320F28335 PARA CONTROLE DO PROTÓTIPO	103
	APÊNDICE B – ADVERSIDADES NO USO DO ENCODER INCREMENTAL DYNAPAR B58N.....	114

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente, aumento de custos e a necessidade por reservas cada vez maiores em meio ao aumento da demanda de energia, ocasionou uma diminuição na utilização dos combustíveis fósseis, chamando a atenção de pesquisadores, governos e indústrias para desenvolvimento e aprimoramento de novas fontes de energia sustentáveis. Assim, o desenvolvimento de novas técnicas no processamento de energia, os estímulos governamentais e a diminuição nos preços têm motivado as fontes de energia se tornarem mais atraentes ao mercado. Entre as fontes de energia renováveis a energia eólica é a que mais cresce atualmente (TAVEIROS, 2014).

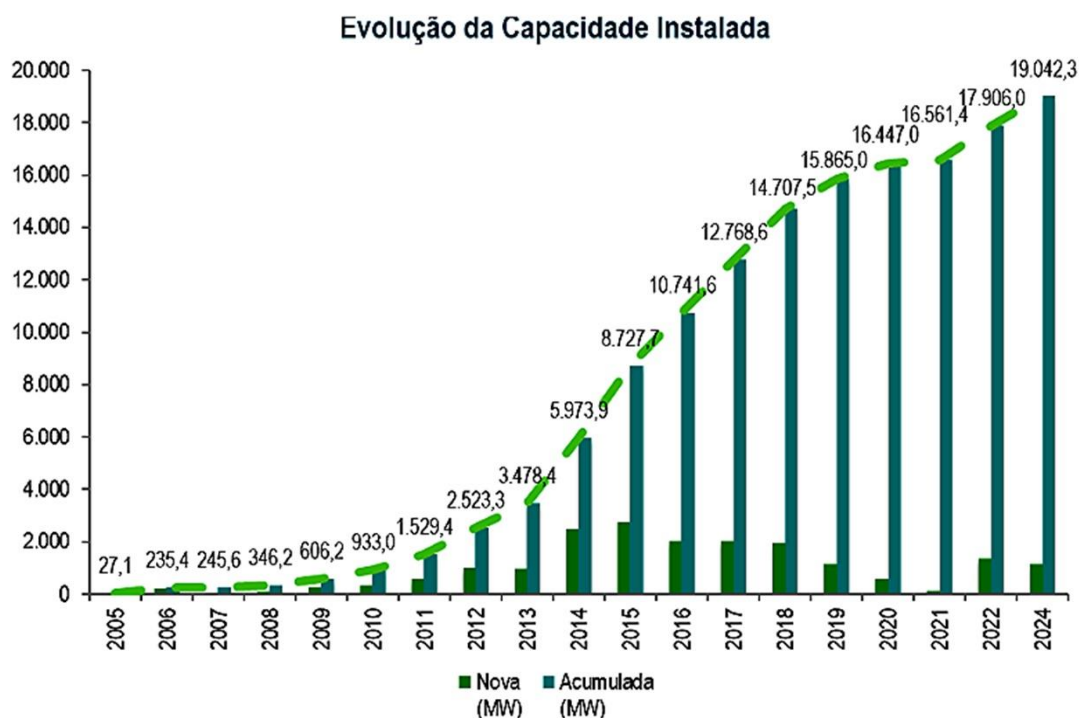
Por se tratar de uma preocupação global, países ao redor do mundo estão avançando os estudos em projetos eólicos, começando pela investigação de novas técnicas nas pesquisas até a instalação de parques eólicos. Por se tratar de um recurso limpo e eficaz, a energia eólica se torna uma grande alternativa para o crescimento da demanda energética do país. Pesquisas na prospecção de energia relatam que a eólica pode chegar a colaborar com 12% de todo consumo mundial de energia até o ano de 2020, tendo potencial desse número subir para 22% até o ano de 2030 (SHAFIEI, 2012).

Nos últimos anos no território brasileiro, a energia eólica vem contribuindo cada vez mais na demanda energética do país. A criação do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) e do Ministério das Minas e Energia no ano de 2004, avaliou que essa fonte de energia alcançasse 5,9% da produção nacional. Mesmo o Brasil possuindo um grande potencial eólico, o crescimento dessa tecnologia se torna tardio pelo fato da matriz energética do país ser principalmente composta pela geração hidráulica. Mesmo causando um grande impacto ambiental, a geração hidráulica ainda é vista como uma fonte de energia renovável (BARROS C. M., 2011) (BARROS L. S., 2006).

O aumento significativo da fonte eólica no Brasil tem sido importante para a demanda energética do país, contudo ainda está longe de alcançar todo seu potencial. As pesquisas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) mostram que o país tem um potencial de 300 GW de geração eólica, condizendo com 2,2 vezes a matriz elétrica brasileira (CASADOSVENTOS, 2017).

A Figura 1.1 mostra a capacidade e o crescimento da energia eólica instalada entre os anos de 2005 e 2024. Apesar de lento, observa-se uma clara expansão na adoção desse tipo de energia renovável.

Figura 1.1 - Capacidade e crescimento global da energia eólica nos anos de 2005 e 2024.

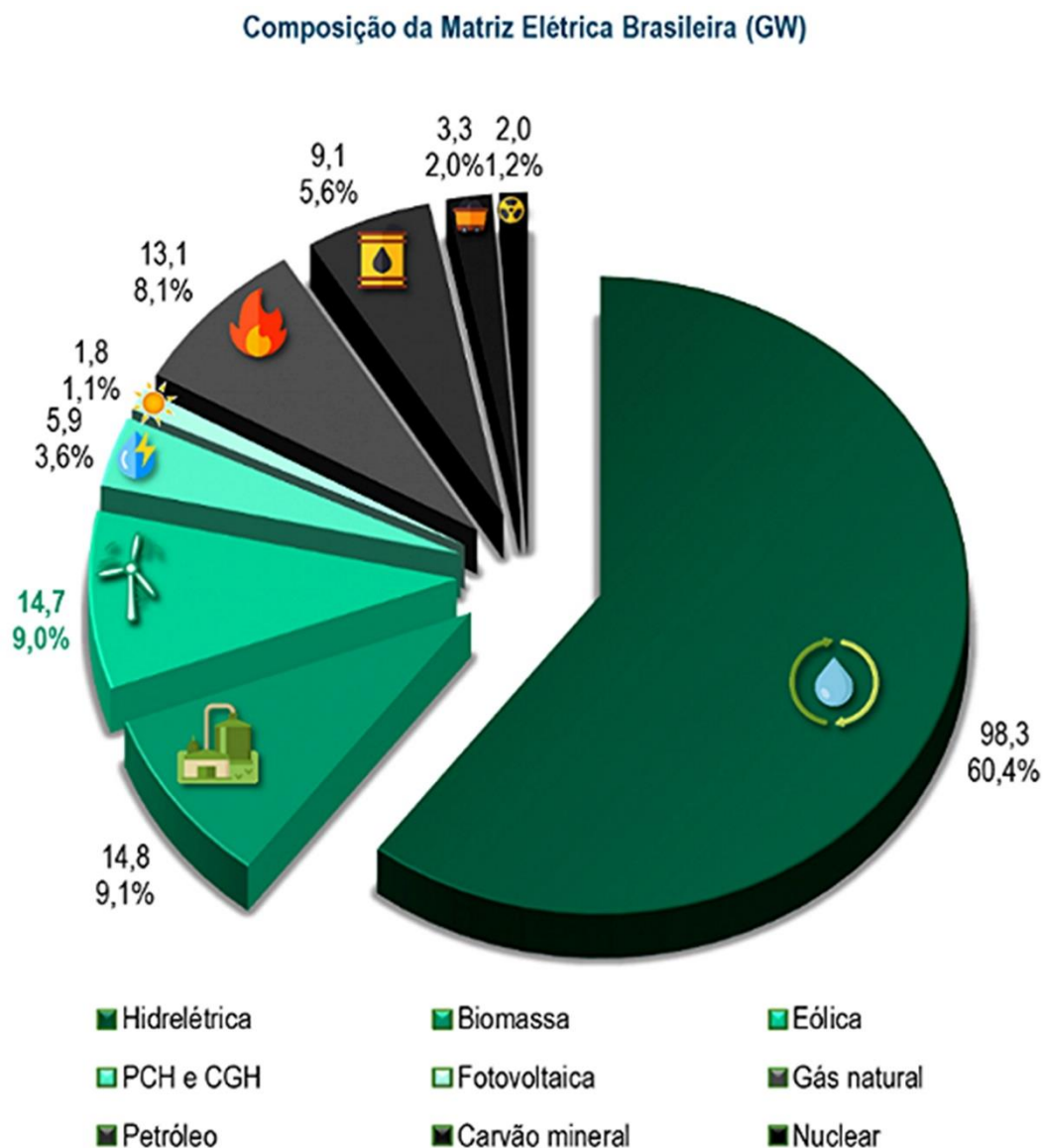


Fonte: (ABEEólica, 2019).

O gráfico da Figura 1.1 mostra dois tipos de dados. O primeiro informa as novas fontes de geração de energia eólica instaladas no país, já o segundo tipo informa a potência acumulada ao decorrer dos anos, transparecendo o aumento da capacidade instalada desse tipo de energia no país. Percebe-se que entre os anos de 2017 e 2018 houve um aumento na produção de energia elétrica a um nível superior a 1,9GW. Esse número ainda é muito pequeno quando comparado a toda capacidade do país, tendo em vista que o Brasil possui um grande território e com área de grande incidência de ventos capazes de gerar potência elétrica considerável.

A Figura 1.2 ilustra os principais tipos de geração de energia elétrica do Brasil, ressaltando o índice da energia eólica em relação aos outros tipos de geração de fontes de energia renováveis.

Figura 1.2 – Matriz energética brasileira atualizada em fevereiro de 2019.



Fonte: (ABEEólica, 2019).

Como pode ser visto no gráfico presente na Figura 1.2, a grande expansão da geração eólica permitiu que ela alcançasse praticamente os mesmos níveis da geração pela biomassa, representando 9,0% e 9,1%, respectivamente, da matriz energética brasileira em 2019. Por ser um recurso em abundância em muitas regiões litorâneas do território brasileiro, a energia elétrica proveniente da força dos ventos tem toda capacidade de ser o recurso renovável capaz de diminuir o uso da energia vinda das hidrelétricas, que representa a principal fonte de energia do país com 60,4%.

As turbinas podem ser divididas a partir de dois modos: velocidade fixa ou velocidade variável. Quando o gerador é conectado diretamente à rede elétrica e essa

impõe sua velocidade síncrona, esses modelos são caracterizados por turbinas de velocidade fixa. Quando ocorre o controle da velocidade síncrona do gerador por algum mecanismo de eletrônica de potência, são os modelos definidos por turbinas de velocidade variável. As turbinas de velocidade variável se destacam por aproveitarem melhor a energia disponível, diminuir o estresse na estrutura mecânica, diminuir ruídos e pela oportunidade de monitorarem as potências ativa e reativa do gerador (BARROS L. S., 2006).

Além disso, as turbinas de velocidade variável podem ajustar frequentemente sua velocidade de rotação síncrona à velocidade do vento disponível, possibilitando assim, uma maior eficiência na conversão de energia para várias velocidades de vento. Fazendo isso, o índice de velocidade de ponta, definido como a razão entre a velocidade da ponta da lâmina para a velocidade do vento, consegue se manter impecável para atingir a máxima eficiência de conversão de energia em diversas velocidades do vento. Para conseguir que a velocidade da turbina se torne adaptável, o gerador da turbina é conectado à rede elétrica por um conversor. Esse conversor possibilita o controle da velocidade do gerador que está mecanicamente conectado ao rotor (pás) da turbina eólica (REIS, 2013).

Outra vantagem das turbinas de velocidade variável é o aumento da produção de energia eólica, uma energia de melhor qualidade e um desgaste mecânico menor comparado as turbinas de velocidade fixa. Por outro lado, este tipo de turbina apresenta algumas desvantagens quando comparada as turbinas de velocidade fixa, como por exemplo, o aumento da produção de perdas de energia e um elevado custo devido ao uso de conversores de potência. Entretanto, as perdas de energia e o custo adicional são compensados pela maior produção de energia elétrica. Na Tabela 1.1 são apresentadas as principais características das turbinas de velocidade variável e de velocidade fixa.

No âmbito da pesquisa especificamente, salienta-se alguns projetos nos quais desejam alcançar: aquisição de topologias mais atraentes nos aspectos construtivos e operacionais; melhoria no processamento de energia e sua conversão em associação as suas estratégias operacionais; análises das situações transitórias, dinâmicas e em regime permanente realizada em ambientes computacionais e laboratoriais; análise operativa dos centros eólicos na conexão com as redes de energia; entre outros. Todos esses temas são partes no desenvolvimento de um tipo de energia, que raramente era abordado no Brasil, exceto por alguns pesquisadores e pequenas aplicações (ALVARENGA, 2012).

Tabela 1.1 - Principais características das turbinas de velocidade fixa e variável.

MODO DE VELOCIDADE	VANTAGENS	DESVANTAGENS
VELOCIDADE FIXA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simples, robusto e confiável; ▪ Baixo custo e manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relativamente baixa eficiência de conversão de energia; ▪ Alta tensão mecânica; ▪ Flutuações de potência para a rede elétrica.
VELOCIDADE VARIÁVEL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta eficiência na conversão de energia; ▪ Melhoria da qualidade de energia; ▪ Estress mecânico. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Custos e perdas devido ao uso de conversores adicionais; ▪ Sistema de controle mais complexo

Fonte: (REIS, 2013).

Em relação aos cuidados fundamentais em relação ao tema, a ligação de centrais eólicas ao sistema elétrico é gerenciada pelas condições impostas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Essa ligação pode ocasionar impactos nos indicadores de qualidade da energia em dois grupos. A princípio, o parque eólico influencia a rede elétrica e essa afeta o desempenho na unidade de geração, no qual ele não funciona isoladamente, mas certamente, ligado a um ponto do sistema elétrico de potência. O segundo grupo evidencia a chance da conexão acontecer próximo ao barramento de baixo nível de curto circuito, situação desfavorável para o tema mencionado (ALVARENGA, 2012).

Diante dessa problemática, viu-se necessário cada vez mais a elaboração de processos que avaliem e que permitam investigar os impactos da interligação das unidades eólicas junto ao sistema elétrico comercial. A partir disso, alternativas foram sendo desenvolvidas para um melhor entendimento dos fenômenos da geração eólica, como, por exemplo, a implementação de estruturas laboratoriais que constituem um aerogerador em consonância com os arranjos reais e consequentemente a implementação em forma de protótipo em escala reduzida que permitam reproduzir os fenômenos relevantes da geração de energia elétrica. Diante da necessidade de analisar os fenômenos da geração eólica e reconhecendo a identidade de laboratórios que utilizam túneis de vento, turbinas, geradores e conversores em concordância com instalações reais, surge também a opção de uma estrutura em escala ainda mais reduzida.

Objetivando uma maior simplicidade construtiva, sem perder as características da geração eólica, optou-se pela substituição dos túneis de vento por motores de corrente

contínua ou de indução devidamente controlados a fim de reproduzir as características da fonte de energia primária, ou seja, o vento.

Desta forma, esta pesquisa propõe a construção de uma estrutura laboratorial, em escala reduzida, de uma unidade de conversão eólica a velocidade variável. O modelo construído será capaz de emular o comportamento dos ventos a partir do controle da velocidade do motor de corrente contínua e a geração de energia será otimizada com a utilização de uma das técnicas de rastreamento de máxima potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking) injetando energia em um barramento CC.

1.1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho divide-se da seguinte forma: no capítulo 2 será apresentado o estado da arte contendo as principais pesquisas referentes aos princípios de funcionamento de sistemas eólicos com a utilização de técnicas de controle para uma melhor utilização da energia eólica. Será apresentado também a estrutura completa do sistema, que é composta por um motor CC e seu controle de velocidade e uma máquina síncrona trifásica acoplada ao eixo do motor CC. Conectado aos terminais do gerador síncrono tem-se um retificador não controlado cascadeado com um conversor CC-CC *Boost*, este último responsável pelo MPPT.

No capítulo 3 serão apresentados as especificações, a modelagem matemática e o dimensionamento dos parâmetros do motor CC, da máquina síncrona, do retificador trifásico e do conversor CC-CC *Boost* aplicado ao sistema eólico para extração de potência. A modelagem será realizada a partir do modelo médio no espaço de estados para obtenção da função de transferência da planta para o controle em malha fechada.

O capítulo 4 demonstra as estratégias de controle do motor CC e do conversor *Boost* utilizados. O motor CC terá sua velocidade controlada de acordo com um perfil de vento e o conversor *Boost* irá controlar a corrente de entrada no seu indutor, extraindo a máxima potência fornecida pelo conjunto motor-gerador que emula um aerogerador. Em seguida, serão apresentados os critérios de projeto dos controladores atuantes nas malhas de controle tanto do motor CC como do conversor *Boost*, a partir de uma análise de estabilidade e de resposta transitória via diagramas de Bode e lugar geométrico das raízes.

O capítulo 5 expõe os principais resultados de simulação e experimentais obtidos para validação do sistema analisado. São apresentados os resultados do controle proposto para o motor CC, as formas de onda geradas nos terminais da máquina síncrona, a saída do retificador e os resultados obtidos pelo conversor CC-CC *Boost*.

No capítulo 6 serão exibidas as conclusões gerais. Para finalizar o documento, serão apresentadas as referências bibliográficas, o apêndice composto do código embarcado no microprocessador DSP (*Digital Signal Processor*) TMS320F28335, utilizado para o controle do sistema, bem como os principais obstáculos encontrados no desenvolvimento deste trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

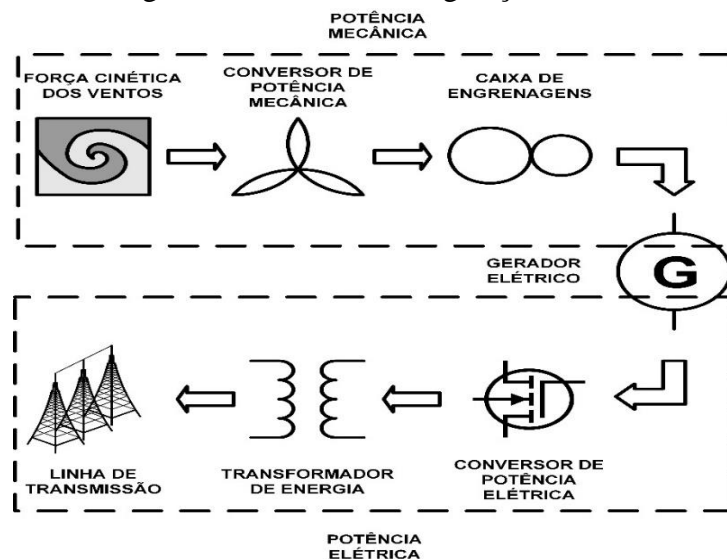
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta os principais tipos de geração de energia eólica, com ênfase nos tipos de geradores utilizados. Serão apresentadas as principais características dos modelos de aerogeradores, as técnicas de extração da máxima potência tradicionalmente utilizadas e suas vantagens no que tange a injeção de potência em um barramento CC.

2.2. TOPOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

A geração de energia elétrica através do vento é realizada a partir das chamadas turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores. Esses aerogeradores são compostos basicamente por pás, eixos de baixa e alta velocidade e o gerador de energia. As pás são responsáveis pela captação da energia cinética dos ventos. O eixo de baixa velocidade é ligado geralmente a uma caixa de engrenagens responsável por multiplicar a velocidade das pás e o eixo de alta velocidade é ligado ao gerador que é responsável pela geração de energia elétrica. Após a conexão de componentes mecânicos o sistema também passa por uma ligação elétrica, onde, se interliga retificadores, conversores cc-cc, inversores de frequência, filtros de conexão com a rede e o sistema elétrico. O sistema pode ser ilustrado de acordo com a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Sistema de geração eólica.



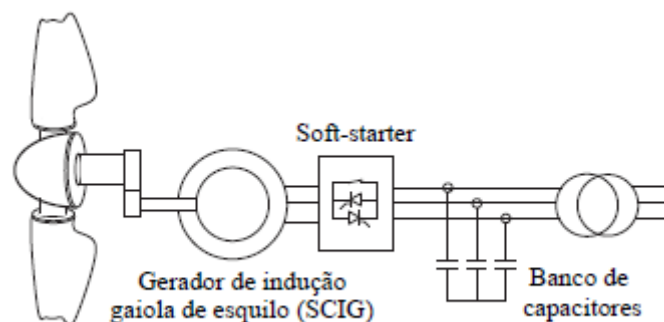
Fonte: Dados do próprio autor.

2.2.1. TIPOS DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

Os Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE) são divididos em dois tipos: turbinas de velocidade fixa e turbinas de velocidade variável. As turbinas de velocidade fixa possuem uma estrutura mais simples, com poucos recursos na otimização da extração de energia do vento. Já as turbinas de velocidade variável classificam-se em três topologias basicamente, diferenciando principalmente no modo como a eficiência aerodinâmica do rotor é definida para condições adversas de velocidade de vento, conforme evidenciado abaixo (TAVEIROS, 2014):

- **Turbinas de velocidade fixa:** são turbinas que utilizam em sua composição um gerador de indução gaiola de esquilo (*Squirrel Cage Induction Generator - SCIG*) que são ligados, através de um transformador, à rede de energia, como mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 – Turbina eólica com velocidade fixa.



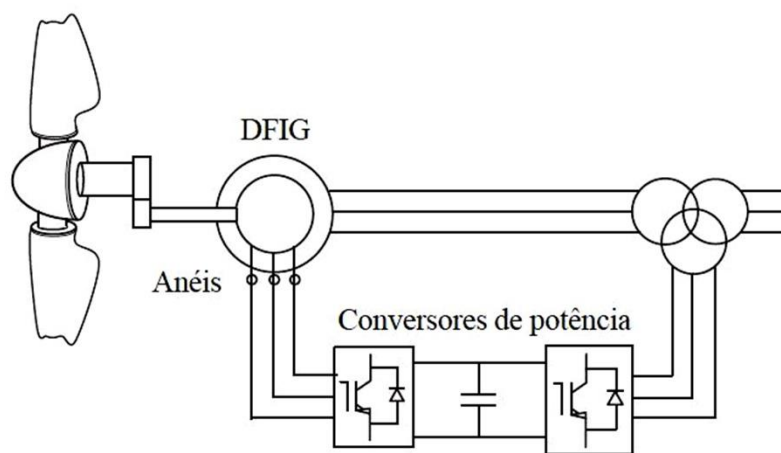
Fonte: (TAVEIROS, 2014).

As turbinas de velocidade fixa receberam esse nome por não existir um controle automático na velocidade de rotação da turbina, com isso o gerador funciona em velocidade quase constante vinculada a frequência da rede. Esses aerogeradores necessitam de dispositivos que compensem a energia reativa exigida na partida da máquina e materiais adicionais para o controle de operação, como por exemplo as *soft-starters* e algum dispositivo de proteção que evita a operação da máquina como motor durante os ventos de baixa intensidades. Por serem turbinas de baixa complexidade, possuem como maior benefício o baixo custo de implementação e manutenção. Em desvantagem, evidencia-se a baixa eficiência e a utilização de energia reativa, visto que não existe controle de potência ativa ou reativa no sistema. Outra característica dessas turbinas envolve a conversão de flutuações do

vento em flutuações mecânicas na qual são convertidas em flutuações elétricas (*flicker*). E essas acabam influenciando na qualidade da energia no ponto de acoplamento com a rede elétrica (TAVEIROS, 2014).

- **Turbinas de velocidade variável com conversor de potência parcial:** esse tipo de estrutura permite o controle de velocidade da turbina com o uso de um gerador de indução duplamente alimentado (*Doubly Fed Induction Generator* - DFIG). Os enrolamentos do rotor são interligados a um conversor *back-to-back* por anéis de escorregamento, como ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Turbina eólica com DFIG de velocidade variável.



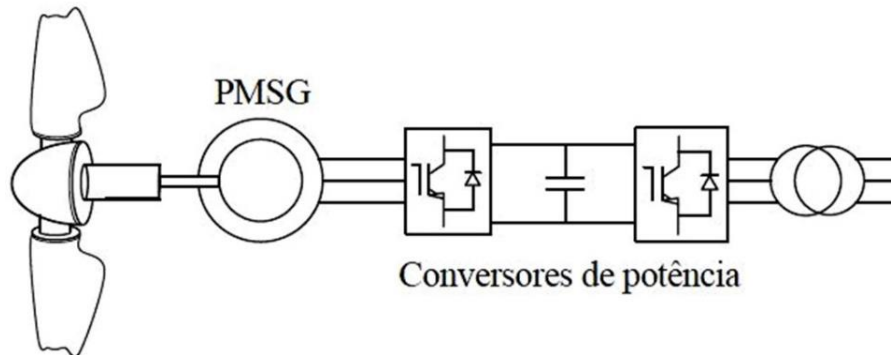
Fonte: (TAVEIROS, 2014).

O controle da frequência do rotor é realizado pelo conversor de potência, que controla de forma indireta a velocidade do rotor. Nesta estrutura a velocidade do DFIG se mantém próximo de 30% da sua velocidade síncrona. Como o rotor do DFIG consegue processar apenas a potência de escorregamento, a potência dos conversores é estipulada em 30% da potência nominal do sistema. Em turbinas de alta potência é observado, como ponto positivo, a estrutura dos conversores com caracterizações menores. Nessa configuração a compensação de potência reativa é alcançada no sistema. Por ter um controle definido e isolado em relação ao torque e a velocidade, assim como das potências ativa e reativa, os aerogeradores com utilização do DFIG se tornam de grande aplicabilidade (TAVEIROS, 2014).

- **Turbinas de velocidade variável com conversor de potência total:** esta estrutura utiliza um conversor de potência *back-to-back* e um gerador síncrono de ímã permanente (*Permanent Magnet Synchronous Generator* - PMSG). Ao

conversor, os enrolamentos do estator são conectados e através de um transformador ocorre à conexão com a rede, como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Turbina com PMSG de velocidade variável.



Fonte: (TAVEIROS, 2014).

Por se tratar de turbinas que aderem uma estrutura direta, o gerador é ligado ao rotor da turbina sem nenhuma conexão mecânica entre esses componentes. Como a conexão do aerogerador com a rede é feita em sequência, toda potência produzida pela máquina será entregue de maneira integral pelo conversor na mesma frequência da rede. Assim, toda variação de vento capaz de gerar energia elétrica é aproveitada (TAVEIROS, 2014).

A tabela 2.1 apresenta as vantagens e desvantagens dos principais tipos de turbinas mostradas.

De acordo com (TAVEIROS, 2014) grande parte dos laboratórios têm concentrado suas pesquisas no aperfeiçoamento dos SCEE's, impactando de modo direto nos gastos de implantação e na sua capacidade. O desenvolvimento da geração eólica é alcançado quando os limites do sistema são investigados e examinados continuamente. Os parâmetros existentes desses sistemas ainda exigem referências mais fundamentadas em alguns tópicos da tecnologia. Por se tratarem de grandes estruturas, analisar os aerogeradores em funcionamento se torna difícil, sendo assim, adequado emular suas particularidades e seu desempenho em laboratório.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens das turbinas de velocidade fixa e variável.

Topologias do SCEE	Vantagens	Desvantagens
Turbinas de velocidade Fixa	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo. 	<ul style="list-style-type: none"> Baixa eficiência; Consumo de energia reativa; Flutuações do vento em flutuações mecânicas e consequentemente em flutuações elétricas (<i>flicker</i>).
Turbinas de velocidade variável com conversor de potência parcial (DFIG)	<ul style="list-style-type: none"> Capacidade de desacoplamento entre o controle das potências ativa e reativa; Baixo custo comparado ao PMSG; Potência do conversor especificada em 30% da potência nominal. 	<ul style="list-style-type: none"> Necessita de anéis coletores e caixa de engrenagens; Faixa de velocidade limitada.
Turbinas de velocidade variável com conversor de potência total (PMSG)	<ul style="list-style-type: none"> Alcança a máxima faixa de variação de velocidade; Não necessita de caixa de engrenagens; Não precisa de anéis de deslizamentos e escovas; Permite o controle desacoplado das potências ativa e reativa. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto custo; Perdas elevadas; Aumento de conteúdo harmônico; Gerador volumoso; Problemas de desmagnetização dos ímãs em altas temperaturas.

Fonte: Dados do próprio autor.

A instalação de um aerogerador, mesmo de pequeno porte no campus da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), não é uma escolha viável que justifique o investimento devido à pouca ocorrência de ventos com potência suficiente. Diante deste cenário, foi montado um emulador do aerogerador em escala laboratorial que possibilitou o melhor entendimento dos fenômenos na geração eólica de energia. Dentre os principais tipos foi escolhido o sistema de turbina de velocidade variável com conversor de potência total. Esse tipo de estrutura possibilitou a montagem do emulador com controle nas partes mecânicas do sistema e no processamento de potência gerada nos componentes eletrônicos da sua estrutura.

2.3. RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)

Como o sistema de geração de energia eólica possui um comportamento linear da tensão e corrente na saída do gerador utilizado, o uso de técnicas de MPPT se tornou essencial.

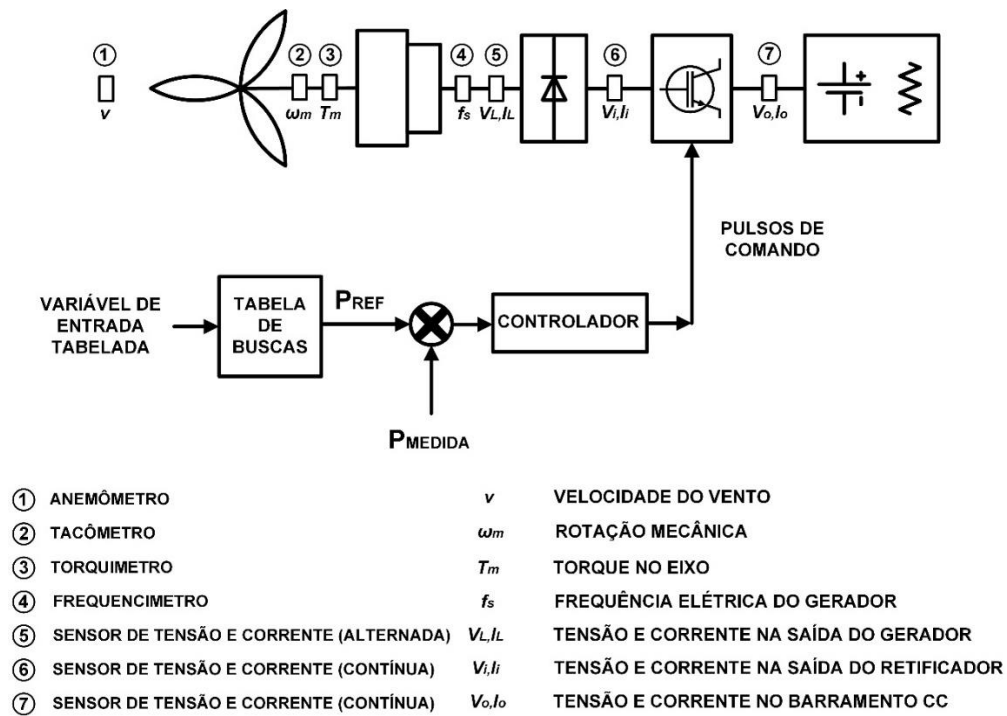
A utilização de uma turbina de velocidade variável em condições de vento inferior a nominal é realizada a partir do controle da aceleração do gerador. Na intenção de potencializar o aproveitamento da energia eólica em diversas intensidades, deve-se realizar o controle da turbina de modo que a velocidade na ponta da pá permaneça em seu valor ótimo (TAVEIROS, 2014).

2.3.1. TÉCNICAS DE MPPT PARA O SISTEMA EÓLICO

As técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (termo do inglês: *Maximum Power Point Tracker* – MPPT) estão em aprimoramento contínuo, sendo que a técnica mais conhecida é fundamentada no princípio da “tabela de buscas”. Esse método funciona da seguinte maneira: em lugares específicos, sejam mecânicos ou elétricos realiza-se uma leitura das variáveis do sistema, tais como, velocidade de rotação, torque no eixo, velocidade do vento, frequência elétrica, tensão ou corrente em algum lugar do gerador. Conhecendo essas variáveis, constrói-se uma tabela “programada” na qual é possível saber a potência máxima acessível. Analisando essa potência pré-definida com a que está sendo drenada do sistema, torna possível mudar o estado de trabalho do conversor e assim alcançar a máxima potência (TIBOLA, 2009).

A Figura 2.5 apresenta um diagrama esquemático que exemplifica o conjunto eólico com rastreamento de máxima potência, utilizando “tabela de buscas”, onde observa-se várias formas de fazer aquisições de potência, tanto para identificar a máxima disponível, quanto para observar a potência drenada e, assim, agir de modo conveniente no controle para extrair a máxima potência.

Figura 2.5 – Diagrama de um sistema de MPPT com tabela de buscas.



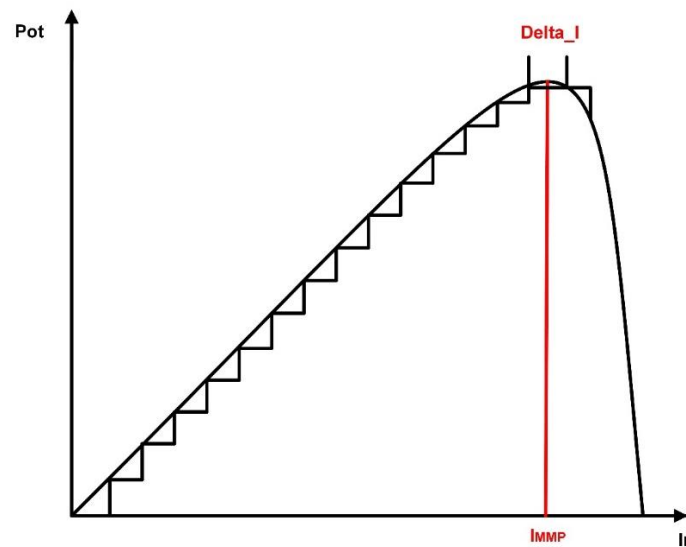
Fonte: Dados do próprio autor.

O diagrama da Figura 2.5 mostra os principais pontos onde os sensores podem ser instalados para mensurar as grandezas pertencentes a “tabela de buscas”. Os sensores informam grandezas mecânicas e elétricas. As grandezas mecânicas são: a velocidade do vento, a velocidade angular no eixo do gerador e seu torque. As grandezas elétricas englobam a frequência da tensão na saída do gerador, os valores das tensões e correntes alternadas geradas, o valor da tensão e corrente contínua na saída do retificador e a tensão e corrente na saída do conversor CC.

Outro método utilizado na busca do ponto de máxima potência e utilizado no sistema deste trabalho é comumente detectado nos sistemas fotovoltaicos. O mesmo consiste no ato de “perturbar e observar” no qual o ponto de operação do conversor é alterado e verificado o processamento de energia disponível. Feito esta análise, a potência disponível é examinada para os dois pontos de operação, caso a potência do novo ponto

seja maior que a do primeiro, o sistema passa a atuar nessa nova região, esse processo é repetido até que a variação de potência do sistema seja igual a zero e assim alcançando seu ponto de máxima potência. Esse método recebe esse nome por funcionar com “perturbações” na razão cíclica do conversor e “observar” o que essas alterações provocam na drenagem de energia do sistema (TIBOLA, 2009). A Figura 2.6 ilustra esse método.

Figura 2.6 – Gráfico generalizando o princípio de rastreamento de máxima potência.



Fonte: Dados do próprio autor.

A Figura 2.6 demonstra as pequenas variações de correntes representadas por “Delta_I” responsáveis pelas “perturbações” no sistema que afetarão o aumento ou decréscimo de energia representado pela potência “Pot” para um determinado valor de corrente.

Outro método comum para a extração de máxima potência nos sistemas eólicos é o controle do *tip speed ratio* (TSR (λ)). O TSR é a associação entre velocidade tangencial na ponta de uma pá em um aerogerador e a velocidade efetiva do vento. A velocidade na ponta das pás pode ser calculada a partir da relação entre a velocidade de rotação do motor (ω), o raio do motor (R) e a velocidade do vento (v) como é mostrado em 2.1 (TIBOLA, 2009).

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2.1)$$

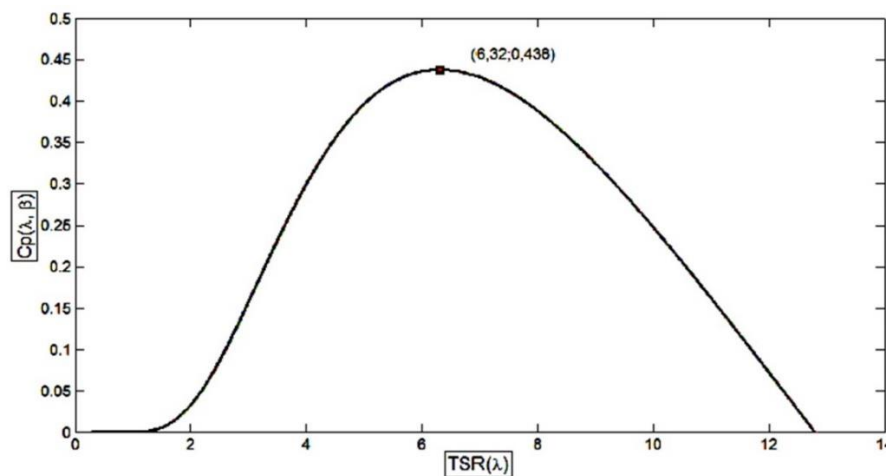
A grandeza que relaciona a fração da potência do vento extraída por uma turbina eólica é denominada coeficiente de potência (C_p). A conversão de energia é diretamente proporcional ao coeficiente de potência, pois, quão grande for o coeficiente de potência maior se torna a transformação de energia. O coeficiente de potência é um modelo específico das turbinas representado em 2.2 (FRANCISCO, 2012).

$$C_p = \frac{\omega T}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (2.2)$$

Onde ρ representa a densidade do ar dada em (Kg/m^3); A é a seção plana transversal dada em (m^2) e v a velocidade do vento especificado em (m/s).

Analizando o coeficiente de potência e o TSR, nota-se que para diferentes velocidades de vento e diversas velocidades de rotação da máquina, percebe-se que o sistema possui características de um ponto de máxima potência (FRANCISCO, 2012). A Figura 2.7 mostra essas características.

Figura 2.7 – C_p em relação ao TSR para diversas velocidade de vento e de rotação da turbina.



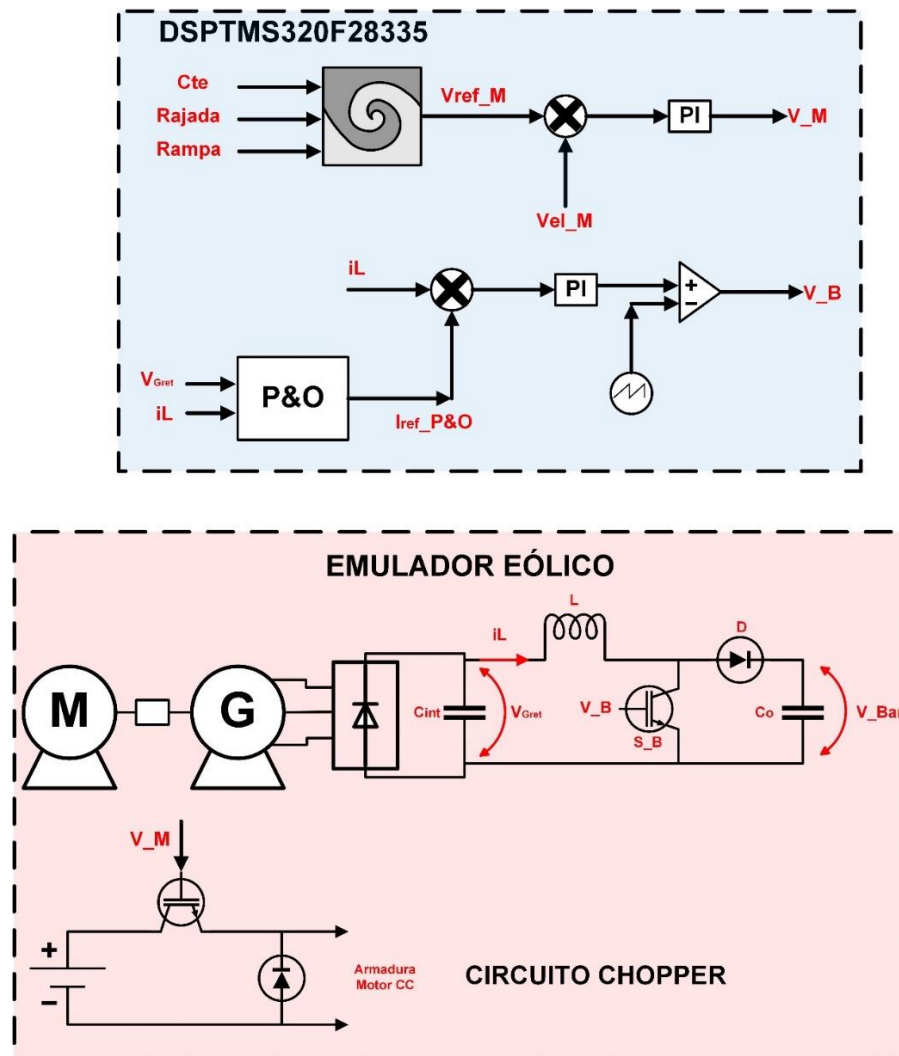
Fonte: (FRANCISCO, 2012).

Segundo (FRANCISCO, 2012) o controle dos aerogeradores pelo TSR é realizado a partir do TSR ótimo, que significa um exclusivo valor de referência de cada máquina. Com o TSR se conservando ótimo, seja qual for a velocidade de vento disponível é possível se obter o ponto de máxima potência (termo em inglês: *Maximum Power Point* – MPP) eólico. As modificações na área da turbina e as oscilações da densidade do ar no decorrer do tempo se tornam fatores inconvenientes para o cálculo e utilização do TSR ótimo teórico.

2.4. ESTRUTURA PROPOSTA NO TRABALHO

Para fins de comprovação e validação da eficácia da estratégia de emular um aerogerador de velocidade variável com conversor de potência total com extração de máxima potência, um tipo dessa estrutura foi projetado e implementado experimentalmente. O diagrama esquemático que representa a referida estrutura é apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Estrutura do sistema eólico constituído por um motor CC conectado a uma máquina síncrona com seu sistema de controle.



Fonte: Dados do próprio autor.

As principais características da força dos ventos foram emuladas a partir de um algoritmo criado para este fim, fornecendo sinais de velocidade para o controle do motor CC. Esses sinais de velocidade fizeram o motor representar de forma satisfatória o comportamento do rotor de um aerogerador em condições de operação na incidência de vento.

O motor utilizado para emular o comportamento do vento em diferentes condições foi um motor CC da Lavil com potência de 1 CV. O gerador de energia utilizado foi uma máquina síncrona também da Lavil com potência de saída de 1 kW. Durante os testes realizados, a máquina síncrona foi utilizada com a configuração semelhante de uma máquina de ímã permanente, alimentando seu campo com uma fonte CC com um valor fixo.

O processo de análise da energia gerada pelo sistema mecânico foi analisado a partir de um retificador trifásico tradicional, passando por um conversor CC – CC e injetado em um barramento de corrente contínua. A extração de máxima potência disponível no sistema foi feita pelo conversor CC – CC do tipo *Boost*. A técnica de MPPT utilizada foi a P&O clássica associada a um algoritmo de controle desenvolvido especificamente para detecção de um ponto global de máxima potência.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os três principais tipos de geração de energia eólica existentes. Com relação as topologias apresentadas, foi implementada a topologia da turbina de velocidade variável com conversor de potência total ao qual se tinha acesso a partir dos materiais dispostos no laboratório. Mesmo com um nível de complexidade maior e um preço mais elevado por causa do processamento total de potência do sistema, a falta de um conjunto de máquinas que dispusesse de uma outra configuração limitou a pesquisa.

Em relação a busca de máxima potência desejada em um sistema eólico, percebeu-se que para cada velocidade do gerador existe um ponto máximo de potência, representando seu ponto ótimo de operação. Para que essa máxima potência fosse extraída foi utilizado a técnica de P&O, pois, independente das variações provocadas na geração, o sistema conseguiria alcançar seu ponto ótimo.

Diante disso, destaca-se como contribuição da pesquisa proposta a implementação de uma estrutura de uma turbina com velocidade variável capaz de emular as principais características dos ventos e operar no ponto de máxima extração de potência. Tal estrutura possibilitará o estudo de fenômenos da geração eólica em uma escala laboratorial, com possibilidade de aprimoramento de diversas técnicas de controle.

3. ESPECIFICAÇÕES, MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DO SISTEMA

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados a modelagem matemática e o dimensionamento de cada elemento constituinte do sistema que inclui: motor CC, máquina síncrona, retificador e conversor CC-CC Boost. O conversor será aplicado no sistema que terá as características de um sistema eólico, emulado pelo conjunto motor gerador, para fins de extração de máxima potência disponível na sua geração.

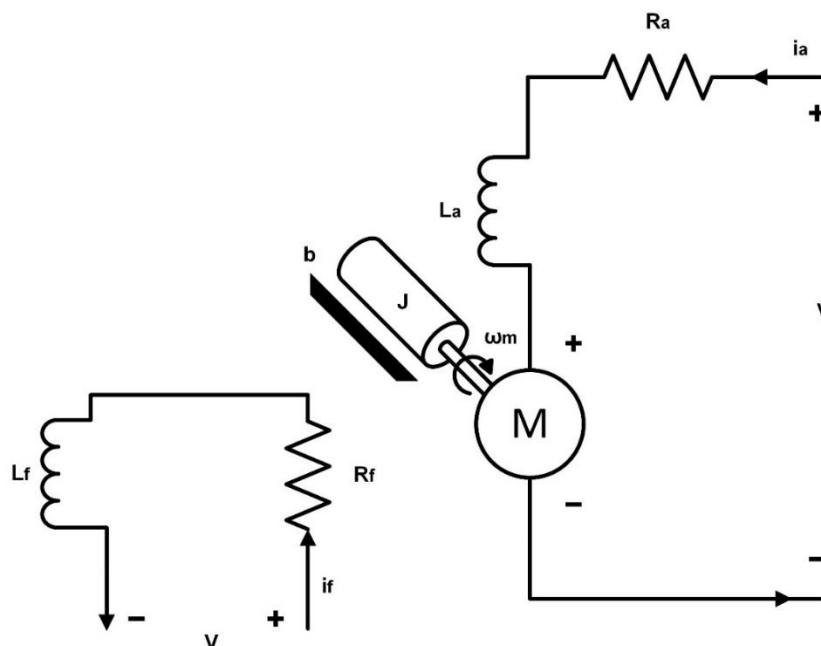
O comportamento estático e/ou dinâmico de um sistema é determinado a partir da modelagem matemática do mesmo, representando-o por uma função de transferência. Essa modelagem será realizada tanto para o motor CC quanto para o conversor Boost utilizando o modelo médio no espaço de estados. A máquina síncrona não foi modelada tendo em vista que foi adotada uma tensão fixa na alimentação de seu campo deixando a máquina ser influenciada apenas pela velocidade imposta no seu eixo mecânico.

3.2. DETERMINAÇÕES DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Em se tratando da exatidão do controle e simplicidade no ajuste de velocidade para diversas situações, os motores CC são muito empregados no ambiente industrial (MAIRINCK, 2014). Como será necessário um controle preciso de velocidade para que o motor emule de maneira desejável os principais fenômenos que constituem o vento, o motor CC foi escolhido para a tarefa.

Alguns parâmetros básicos de um motor CC são apresentados na Figura 3.1 que serão discutidos para obtenção do modelo utilizado no presente trabalho.

Figura 3.1 – Topologia básica de um motor CC.



Fonte: Dados do próprio autor.

A estrutura apresentada na Figura 3.1 demonstra um motor de corrente contínua de excitação independente com uma carga mecânica relacionada. Nessa estrutura, a corrente de campo não sofre alterações, permanecendo em um valor estipulado. A inércia composta pelos elementos girantes, eixo, rotor do motor, carga e acoplamentos é caracterizada por J . O atrito viscoso, existente entre motor e carga, é determinada por b (N.m.s/rad). O torque da carga em contradição à dinâmica do sistema é chamado de T_L . O parâmetro R_a é a resistência do enrolamento da armadura, L_a é a indutância da armadura e ainda, ω_m é a velocidade angular do rotor simbolizada em radianos por segundo. A grandeza L_f é a reatância e R_f a resistência das bobinas de campo (PATENÉ, 2008).

Segundo (MAIRINCK, 2014) três técnicas são comumente encontradas na literatura para o controle da velocidade nos motores CC, são elas: variação da resistência de armadura, variação da tensão de armadura e enfraquecimento da corrente de campo. O primeiro recurso mencionado compõe-se por um reostato R em série com a resistência do rotor R_a (armadura), de modo a ampliar sua resistência. Com isso a redução da tensão se torna proporcional a baixa de velocidade $((R_a + R) * I_a)$. A segunda técnica compreende em variar a tensão da armadura (v) da máquina até seu valor nominal, visto que, o aumento ou decréscimo da tensão influencia de maneira proporcional na

velocidade do motor. Já a terceira técnica baseia-se em controlar o fluxo (i_f) do campo da máquina CC.

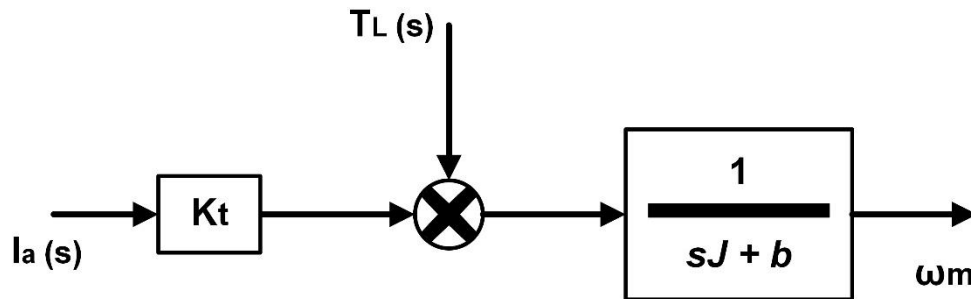
Escolheu-se para controlar a velocidade do motor do presente trabalho a técnica de variação da tensão na armadura, por se tratar de uma grandeza mais robusta, simples implementação e mais eficaz. Diante disso, foi estudado a implementação do motor CC em forma de diagrama de blocos e posteriormente em uma função de transferência no intuito de elaborar seu controle.

A dedução matemática do funcionamento básico do motor CC é demonstrada em (PATENÉ, 2008). Seguindo sua exposição, em (3.1) informa como a velocidade do motor responde em função da corrente de armadura I_a .

$$\frac{w_m(s)}{I_a(s) * k_i - T_L(s)} = \frac{1}{s * J + b} \quad (3.1)$$

Para melhor entendimento de (3.1) seu modelo é apresentado em forma de diagrama de blocos como mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Diagrama de blocos relacionando velocidade e corrente na armadura.



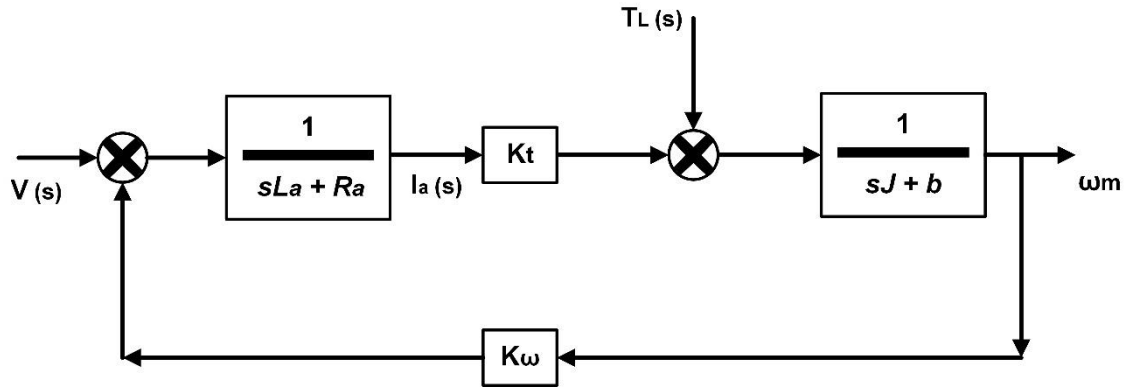
Fonte: Dados do próprio autor.

O intuito é relacionar a velocidade angular do eixo do motor com a tensão imposta na armadura do mesmo. Nesse sentido, seguindo o mesmo raciocínio efetuado para a corrente em relação a velocidade, praticado em (PATENÉ, 2008), a tensão na armadura pode ser relacionada com a velocidade angular, considerando uma carga no motor nula ($T_L(s) = 0$), como apresentado em (3.2).

$$G_M(s) = \frac{w_m(s)}{V(s)} = \frac{\frac{k_t}{J * L_a}}{s^2 + \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{J}\right)s + \left(\frac{R_a * b}{J * L_a} + \frac{k_t * k_w}{J * L_a}\right)} \quad (3.2)$$

A função de transferência apresentada em (3.2) é demonstrada em forma de diagrama de blocos na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Diagrama de blocos do motor CC com entrada de tensão e saída como velocidade.



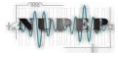
Fonte: Dados do próprio autor.

3.2.1. ESPECIFICAÇÕES DOS PARÂMETROS DO MOTOR CC UTILIZADO

Como visto na Figura 3.3, alguns parâmetros construtivos do motor CC são necessários para sua modelagem. As principais especificações são: a indutância da armadura L_a , a resistência da armadura R_a , o momento de inércia J , o atrito viscoso b e as constantes construtivas do motor, constante de torque elétrico k_t e constante da força eletromotriz k_w . Esses parâmetros foram calculados a partir de ensaios feitos na máquina CC em laboratório.

Os testes foram feitos pré-estabelecendo a velocidade de rotação do motor em torno de 10% do seu valor nominal 1800 rpm. Estabilizou-se a velocidade do motor em 189,75 rpm, cerca de 10,5% do valor nominal, próximo ao valor desejado. Ao atingir essa velocidade foi realizada a leitura dos valores e obteve-se: 0,88 A de corrente na armadura I_a , $2,7\Omega$ das perdas resistivas nos enrolamentos da armadura $(R_a + R_e)$, na qual R_e é a resistência dos cabos utilizados, e 230,4W de potência elétrica P_{el} injetada no motor. Com esses valores foi calculado a potência mecânica gerada pela máquina através de (3.3).

$$P_{mec} = P_{el} - (R_a + R_e) * I_a^2 \quad (3.3)$$



$$P_{mec} = 230,4 - (2,7) * 0,88^2 \quad (3.4)$$

$$P_{mec} = 228,3 \text{ W} \quad (3.5)$$

Com o valor da potência mecânica do motor foi possível calcular o atrito viscoso a partir em (3.6).

$$b = \frac{P_{el}}{w_m^2} \quad (3.6)$$

$$b = \frac{228,3}{189,75^2} \quad (3.7)$$

$$b = 6,34 * 10^{-3} \quad (3.8)$$

As constantes construtivas do motor k_t e k_w correspondem ao mesmo valor pelo fato da potência mecânica desenvolvida no eixo do motor ser igual à potência elétrica associada à força eletromotriz como é representado em (3.9) à (3.12).

$$P_{mec} = P_{ele} \quad (3.9)$$

$$T_m * w_m = E * I_a \quad (3.10)$$

$$(K_t * I_a) * w_m = (k_w * w_m) * I_a \quad (3.11)$$

$$K_t = k_w \quad (3.12)$$

As constantes k_t e k_w foram adquiridas de acordo com (3.13).

$$K_t = k_w = \frac{T_m}{I_a} \quad (3.13)$$

O conjugado mecânico T_m do sistema é calculado de acordo com (3.14).

$$T_m = \frac{P_{mec}}{w_m} \quad (3.14)$$

$$T_m = \frac{228,3}{189,75} \quad (3.15)$$

$$T_m = 1,203 \quad (3.16)$$

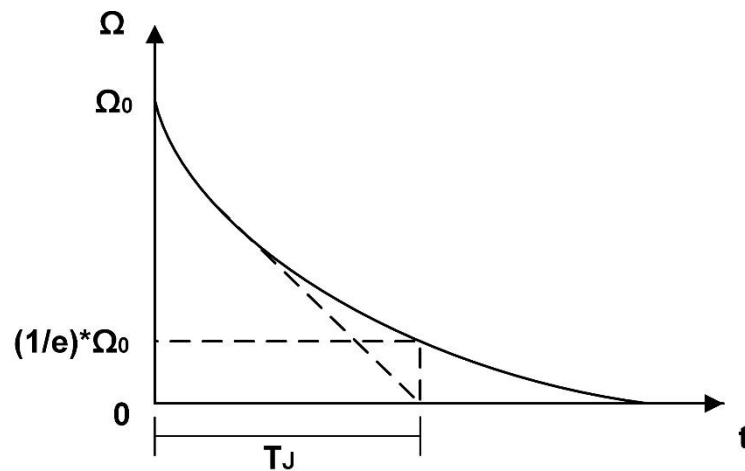
Desta forma, (3.13) se torna:

$$K_t = k_w = \frac{1,203}{0,88} \quad (3.17)$$

$$K_t = k_w = 1,367 \quad (3.18)$$

Outro parâmetro a ser calculado foi o momento de inércia J do motor. Para se calcular esse parâmetro foi estabelecido a velocidade de 1815 rpm em seu eixo. Feito isso, foi necessário fazer uma projeção de acordo com a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Curva de desaceleração do conjunto motor gerador.



Fonte: (SILVA, 2015).

A Figura 3.4 determina que ao estabelecer a velocidade nominal do motor, o mesmo seja desligado e mensurado o tempo de desaceleração até uma velocidade de 36,78% ($1/e$) da sua velocidade inicial. Medido esse tempo e com o valor do atrito viscoso calcula-se, de acordo com (3.19), o momento de inércia do motor. A velocidade de desaceleração chegou a 667,7 rpm e foi mensurado o tempo T_j de 1,6s.

$$T_j = \frac{J}{b} \quad (3.19)$$

$$J = b * T_j \quad (3.20)$$

$$J = 0,010144 \text{ Kg} * \text{m}^2 \quad (3.21)$$

A resistência e a indutância de armadura foram calculadas a partir da aplicação de uma tensão alternada de baixa amplitude no circuito de armadura, obtendo assim uma variação linear entre a tensão e corrente, conseguindo encontrar o módulo da impedância Z . Foi inserido uma tensão de 89,9 volts com uma angulação de 0° , mensurada uma

corrente de 2,6A com angulação de $-69,2^\circ$, uma potência ativa de 50W. A partir desses dados foi calculado a impedância do sistema de armadura como mostra (3.22).

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}_a}{\dot{I}_a} \quad (3.22)$$

$$\dot{Z} = \frac{89,9|0^\circ}{2,6|-69,147^\circ} \quad (3.23)$$

$$\dot{Z} = 34,57|69,147^\circ \quad (3.24)$$

$$\dot{Z} = 12,3 + j32,3 \quad (3.25)$$

Analisando (3.25) e a anotação de números imaginários tem-se:

$$R_a = 12,3\Omega \quad (3.26)$$

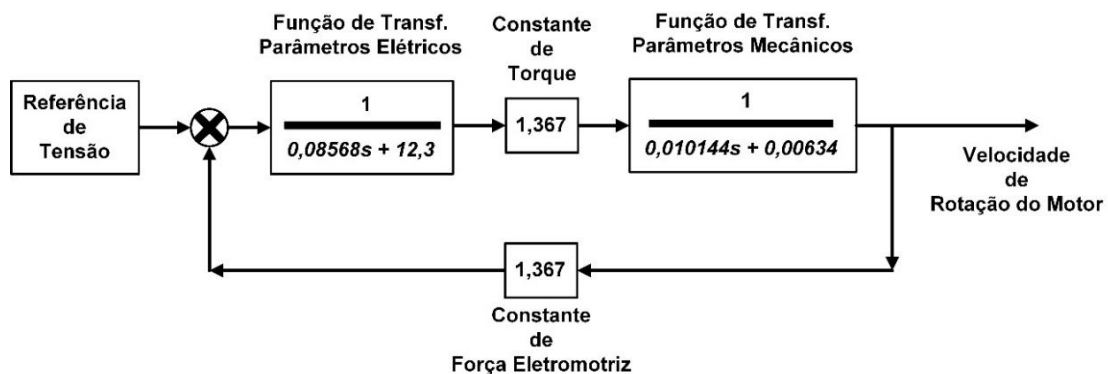
$$L_a = \frac{X_a}{2 * \pi * 60} \quad (3.27)$$

$$L_a = \frac{32,3}{2 * \pi * 60} \quad (3.28)$$

$$L_a = 85,68mH \quad (3.29)$$

Analisando os parâmetros encontrados e comparando com a Figura 3.3 foi possível montar um diagrama de blocos que representasse o comportamento do sistema. A Figura 3.5 apresenta esse diagrama de blocos do motor CC.

Figura 3.5 – Diagrama de blocos do motor CC sem controle.



Fonte: Dados do próprio autor.

A partir do diagrama de blocos, da Figura 3.5, foi possível encontrar a função de transferência do sistema representada por $G_M(s)$, que está especificada em (3.30).

$$G_M(s) = \frac{1572,82}{s^2 + (144,18)s + (2239,77)} \quad (3.30)$$

Os dados de placa do motor CC utilizado são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Especificações do motor CC utilizado.

Especificações	Valores
Potência	1,25 CV (919,4 W)
Velocidade	1880 Rotações por minuto (RPM)
Tensão	180VA / 180VC
Corrente	6 A

Fonte: (LAVILL, 2017).

3.3. EXPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA

Como a máquina síncrona não foi controlada diretamente no sistema, não foi estruturado nenhuma função de transferência que representasse seu comportamento. Seu funcionamento não foi controlado porque foi desejado que ela pudesse trabalhar de forma livre na geração das tensões senoidais.

Desta forma, apenas os dados de placa da máquina síncrona foram necessários para o funcionamento da mesma no sistema. A Tabela 3.2 apresenta essas informações.

Tabela 3.2 – Especificações do gerador trifásico utilizado

Especificações	Valores
Potência	1 KW
Velocidade	1800 (RPM)
Tensão	220/760V D/Y
Fases	3
Corrente	4.1 A
Frequência	60 Hz

Fonte: (LAVILL, 2017).

3.4. ESPECIFICAÇÕES DO RETIFICADOR TRIFÁSICO UTILIZADO

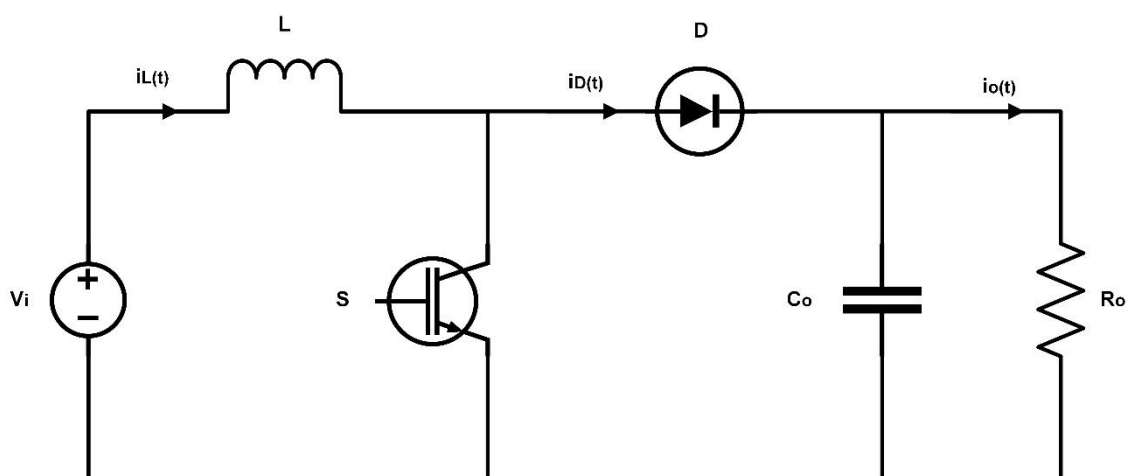
Conforme mencionado, o retificador trifásico utilizado foi um elemento composto por uma estrutura simples, construída a partir da utilização de diodos com características que suportassem os limites operacionais do sistema.

3.5. DETERMINAÇÕES DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC BOOST

O conversor Boost é um conversor CC-CC largamente utilizado para se obter uma tensão média de saída para um nível superior ao de entrada. A tensão de entrada V_i está em série com um indutor L que trabalha como uma fonte de corrente. O interruptor S fornece a energia da fonte e do indutor, em uma operação de liga/desliga repetidamente, no intuito de aumentar a tensão de saída V_o .

O esquemático do conversor *Boost* é ilustrado na Figura 3.6. Quando o interruptor S é acionado, a fonte de entrada fornece energia ao indutor e, o diodo fica reversamente polarizado ($V_o > V_i$). Quando o interruptor é desligado a energia acumulada no indutor é fornecida ao capacitor C_o e à carga R_o . Os modos de operação do conversor são: modo de condução contínua (MCC), onde, a corrente $i_L(t)$ flui de maneira contínua pelo indutor, e o modo de condução descontínua (MCB), ou seja, a corrente se anula em uma parte do período.

Figura 3.6 – Conversor clássico CC-CC *Boost*.



Fonte: Dados do próprio autor.

Na aplicação desse conversor em um sistema eólico, a fonte de tensão de entrada será a tensão de saída de um retificador não controlado e terá amplitude variável, sendo essa controlada para a extração de máxima potência do conjunto motor-gerador. No caso da tensão de saída passa a ser controlada pelo inversor trifásico conectado em série.

A avaliação dos componentes do conversor *Boost*, considerando o MCC, foi elaborado da mesma forma que em (VILELA, 2011).

Os componentes foram determinados de acordo com a necessidade de o conversor atuar no MCC. Os parâmetros iniciais do conversor foram especificados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros do projeto do conversor *Boost*

Parâmetros	Valores
Valor máx. de tensão de entrada retificada (V_{iret})	330 V
Tensão de saída (V_o)	500 V
Potência de saída máx. (P_o)	1000 W
Frequência de chaveamento (F_s)	25 KHz
Resistência de saída para máx. potência (R_o)	250 Ω
Corrente máx. de entrada (I_{int})	4,1 A
Ondulação de corrente no indutor (ΔI_L)	$0,07 * 4,1 = 0,287$ A
Ondulação de tensão de entrada (ΔV_{iret})	$0,01 * 320 = 3,2$ V
Razão cíclica do conversor (D)	$\frac{V_o}{V_{iret}} = \frac{1}{1-D}$ $D = 0,36$

Fonte: Próprio autor.

O valor do indutor utilizado no projeto do conversor *Boost* está especificado em 3.31.

$$L = \frac{V_{iret} * D}{F_s * \Delta I_L} = 16,1 \text{ mH} \quad (3.31)$$

O projeto utiliza dois capacitores, onde, um utilizado em paralelo com a fonte de tensão retificada de entrada e outro é posicionado na saída do conversor disponibilizando um barramento de tensão contínua.

O capacitor de entrada do conversor C_{int} é usado para equilibrar a tensão nos terminais da ponte retificadora, de modo que essa não varie rapidamente devido a comutação da chave. Sendo assim, qualquer capacitor utilizado que não permita uma grande variação de tensão pode ser usado, atentando-se aos limites que o mesmo será submetido (RIBEIRO, 2011).

De acordo com (JÚNIOR, 2017), o dimensionamento do capacitor C_{int} foi realizado de acordo com 3.32.

$$C_{int} = \frac{P_o}{4 * \pi * f * V_{iret} * \Delta V_{iret}} \quad (3.32)$$

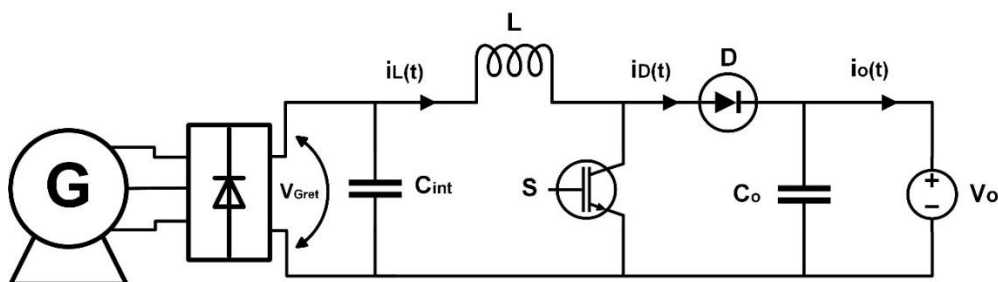
A frequência f da tensão nas extremidades do retificador corresponde ao dobro da frequência fundamental da rede de energia (120) Hz (JÚNIOR, 2017). Desta forma, o capacitor de entrada é $C_{int} = 1,3$ mF.

Os componentes utilizados no protótipo foram um indutor L de 7mH, o capacitor de entrada C_{int} foi montado um banco de 1,34mF com capacitores de 220μF em série, para aumento de tensão, e em paralelo, para aumento de sua capacitância. Para o capacitor C_o do barramento CC, esse já controlado por um inversor, também foi utilizado um banco de capacitores 220μF, totalizando uma capacitância de 440μF.

3.5.1. MODELAGEM DO CONVERSOR CC-CC BOOST

Tradicionalmente, o controle nos conversores CC-CC ocorre nas variáveis: corrente de entrada, tensão de saída ou ambos. Visto que a fonte de energia do sistema se dará a partir de uma máquina síncrona funcionando como gerador, o mesmo tem características de uma fonte de corrente. A corrente de entrada do conversor, ou corrente no indutor L , deve ser controlada para que ocorra a extração de máxima potência do sistema. Como o conversor *Boost* será conectado a um inversor, a tensão de saída do mesmo será regulada a partir desse inversor. Com isso, as variáveis controladas no sistema para o monitoramento da máxima potência foram a corrente $i_L(t)$ do indutor L e a tensão de entrada $V_{GRet}(t)$ nos terminais do capacitor C_{int} . Um esboço do conversor que será modelado é demonstrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Máquina síncrona em série com retificador e Conversor *Boost*.

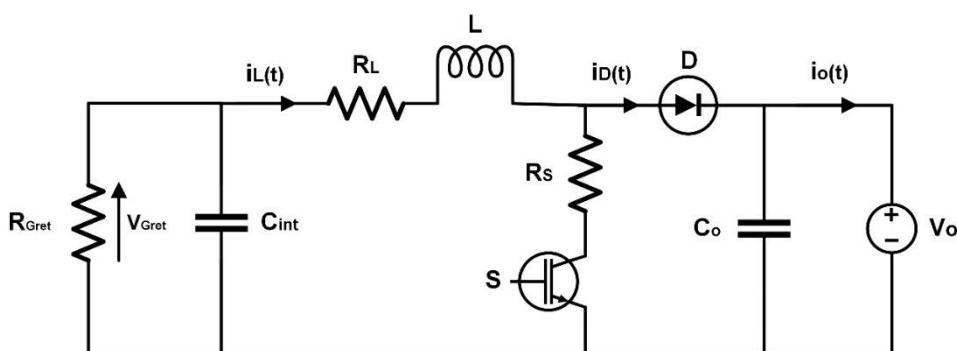


Fonte: Dados do próprio autor.

A modelagem do conversor *Boost* foi realizada analisando suas duas formas de funcionamento. De acordo com a Figura 3.7 seu funcionamento se baseia em duas maneiras: a primeira se dá quando o interruptor S está em condução e o diodo D está polarizado reversamente, e a segunda quando o diodo está conduzindo e o interruptor fica em corte, não permitindo passagem de corrente pelo seu ramo.

Como o conversor *Boost* modelado não terá características ideais em funcionamento, foram consideradas algumas fontes de perdas de energia. Essas perdas são causadas na condução do interruptor S , simbolizada por R_S , a perda no indutor L representada por R_L e a queda de tensão provocada pelo diodo D mostrada por V_D . As perdas causadas no capacitor foram desconsideradas na modelagem. O esquemático do conversor modelado é representado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Esquemático do conversor *Boost* modelado.



Fonte: Dados do próprio autor.

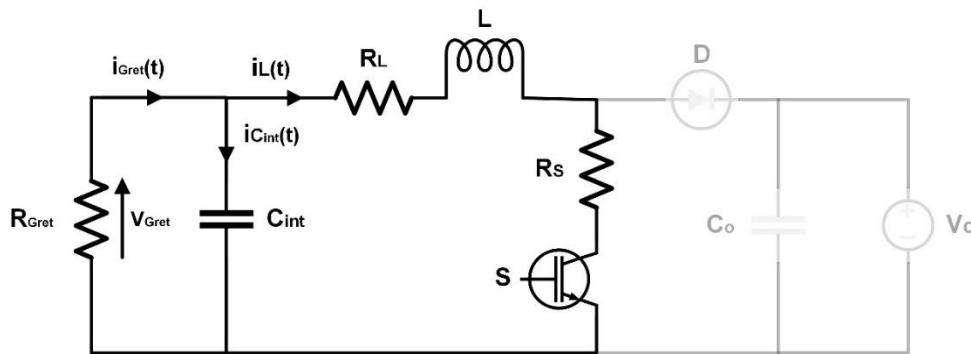
Conforme mencionado, a tensão de saída do conversor será controlada pelo inversor, e desta forma, para modelagem do conversor sua saída foi representada por uma fonte de tensão. Como a tensão de entrada pode sofrer algumas oscilações por causa do funcionamento do grupo motor-gerador, essa tensão foi indiretamente controlada pelo

controle da corrente i_L do indutor L , e desta forma, não permitindo mudanças bruscas na amplitude dessa tensão que pudesse danificar os componentes do circuito. Outro detalhe importante foi que a máquina síncrona juntamente com o retificador foram representados por meio de uma resistência R_{GRet} , que emulou o comportamento para a pior condição de funcionamento do sistema, sendo inserida em paralelo com o capacitor de entrada C_{int} .

A modelagem do conversor foi implementada a partir da passagem de corrente no interruptor S e o corte de condução no diodo D . Tal situação é demonstrada na Figura 3.9.

Os modelos físicos para os conversores CC se dão em relação aos elementos armazenadores de energia que se encontram em sua estrutura, no caso do *Boost* a modelagem será realizada em relação a corrente no indutor e a tensão do capacitor de saída ou de entrada. Como o conversor em questão será acoplado a um inversor e sua tensão de saída controlada pelo mesmo, a modelagem será feita em cima da corrente $i_L(t)$ do indutor L e a tensão V_{GRet} do capacitor C_{int} .

Figura 3.9 – Primeira etapa de atuação do conversor *Boost*.



Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 3.9, e aplicando a lei de Kirchhoff das tensões (LKT), tem-se:

$$V_{GRet} - R_L * i_L(t) - V_L - R_S * i_L(t) = 0 \quad (3.33)$$

$$V_L = V_{GRet} - R_L * i_L(t) - R_S * i_L(t) \quad (3.34)$$

$$L * \frac{di_L(t)}{dt} = V_{GRet} - R_L * i_L(t) - R_S * i_L(t) \quad (3.35)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{GRet}}{L} - \frac{R_L * i_L(t)}{L} - \frac{R_S * i_L(t)}{L} \quad (3.36)$$

Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes (LKI), tem-se:

$$i_{GRet} = i_L(t) + i_{Cint}(t) \quad (3.37)$$

$$i_{GRet} = i_L(t) + C_{int} * \frac{dV_{GRet}(t)}{d_t} \quad (3.38)$$

$$\frac{dV_{GRet}(t)}{d_t} = \frac{i_{GRet}(t)}{C_{int}} - \frac{i_L(t)}{C_{int}} \quad (3.39)$$

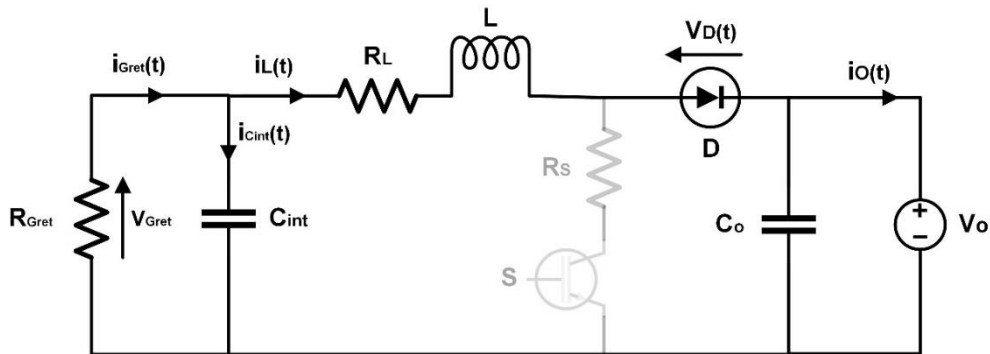
$$\frac{dV_{GRet}(t)}{d_t} = -\frac{V_{GRet}(t)}{R_{GRet} * C_{int}} - \frac{i_L(t)}{C_{int}} \quad (3.40)$$

Colocando (3.36) e (3.40) em forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{d_t} \\ \frac{dV_{GRet}(t)}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_L - R_S & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_{GRet}(t) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Da mesma forma que foi realizada essa primeira modelagem, a segunda análise para quando o interruptor S está em corte e o diodo D está em condução também foi realizada. A Figura 3.10 demonstra como essa condição altera o sistema.

Figura 3.10 – Segunda etapa de atuação do conversor *Boost*.



Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 3.10 e aplicando a lei de Kirchhoff das tensões (LKT), a segunda etapa de operação fornece as seguintes equações:

$$V_{GRet} - R_L * i_L(t) - V_L - V_D - V_o = 0 \quad (3.42)$$

$$V_L = V_{GRet} - R_L * i_L(t) - V_D - V_o \quad (3.43)$$

$$L * \frac{di_L(t)}{dt} = V_{GRet} - R_L * i_L(t) - V_D - V_o \quad (3.44)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{GRet}}{L} - \frac{R_L * i_L(t)}{L} - \frac{V_D}{L} - \frac{V_o}{L} \quad (3.45)$$

Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes (LKI), tem-se:

$$i_{GRet} = i_L(t) + i_{cint}(t) \quad (3.46)$$

$$i_{GRet} = i_L(t) + C_{int} * \frac{dV_{GRet}(t)}{dt} \quad (3.47)$$

$$\frac{dV_{GRet}(t)}{dt} = \frac{i_{GRet}(t)}{C_{int}} - \frac{i_L(t)}{C_{int}} \quad (3.48)$$

$$\frac{dV_{GRet}(t)}{dt} = -\frac{V_{GRet}(t)}{R_{GRet} * C_{int}} - \frac{i_L(t)}{C_{int}} \quad (3.49)$$

Colocando (3.45) e (3.49) em forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dV_{GRet}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_{GRet}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_o \\ V_D \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Desta forma, com (3.41) e (3.50) é possível montar um estado de funcionamento para o sistema. Uma forma que se consegue avaliar e desenvolver controles para tal situação é a análise do sistema a partir das equações de espaço de estado.

A relação matricial que determina qualquer sistema físico com múltiplas entradas e saídas conforme um sistema invariante no tempo é representada em (3.51).

$$\frac{dx(t)}{dt} = A * x(t) + B * u(t) \quad (3.51)$$

Onde:

$x(t)$ – Vetor de estados;

$\frac{dx(t)}{dt}$ – Derivada do vetor de estados;

$u(t)$ – Vetor de entrada;

A – Matriz de sistema;

B – Matriz de entrada.

Como a modelagem do sistema foi realizada em cima da corrente $i_L(t)$ e da tensão $V_{GRet}(t)$ essas variáveis definem o vetor de estados do sistema. O vetor de entrada informa quais são as fontes independentes contidas no sistema, assim, no conversor em questão, as fontes V_o e V_D representaram esse vetor. Desta forma, os vetores de estados e de entrada são representados em (3.52) e (3.53) respectivamente.

$$x(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_{GRet}(t) \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} V_o(t) \\ V_D(t) \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Como para cada configuração do circuito existem dois conjuntos de matrizes, então a modelagem por variáveis de estados também apresentou dois conjuntos de matrizes de estado. Assim, para a condução no interruptor S foi denominado para a matriz de sistema e de entrada as variáveis A_1 e B_1 respectivamente. E quando o interruptor ficou em corte, as matrizes foram denominadas A_2 e B_2 . Essas matrizes são representadas em (3.54) e (3.55).

$$A1 = \begin{bmatrix} \frac{-R_L - R_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \quad B1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$A2 = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \quad B1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Considerando a operação em MCC do conversor e analisando um período de chaveamento é possível elaborar uma média das matrizes de sistema e de entrada onde são denominadas A_{med} e B_{med} respectivamente e são demonstradas a seguir.

$$A_{med} = A_1 * D + A_2 * (1 - D) \quad (3.56)$$

$$A_{med} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L - R_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} * D + \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} * (1 - D) \quad (3.57)$$

$$A_{med} = \begin{bmatrix} \frac{-DR_L - DR_S}{L} & \frac{D}{L} \\ -\frac{D}{C_{int}} & -\frac{D}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{-DR_L}{L} & \frac{D}{L} \\ -\frac{D}{C_{int}} & -\frac{D}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$A_{med} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L - DR_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$B_{med} = B_1 * D + B_2 * (1 - D) \quad (3.60)$$

$$B_{med} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * D + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * (1 - D) \quad (3.61)$$

$$B_{med} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{D}{L} & -\frac{D}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

$$B_{med} = \begin{bmatrix} \frac{D-1}{L} & \frac{D-1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

Encontrado as matrizes de sistema e de entrada médias, foi elaborado uma linearização do sistema de equações ao redor do ponto de operação desejado. No sistema estudado, será realizado a linearização do sistema em regime permanente. Como essa operação é praticada em regime permanente, a derivada da matriz de estados será nula. Assim as matrizes se tornam:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A * x(t) + B * u(t) \quad (3.64)$$

$$0 = A_{med} * X + B_{med} * U \quad (3.65)$$

$$X = -A_{med}^{-1} * B_{med} * U \quad (3.66)$$

Substituindo (3.53), (3.59) e (3.63) em (3.66), tem-se:

$$X = - \begin{bmatrix} \frac{-R_L - DR_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{D-1}{L} & \frac{D-1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_o \\ V_D \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$$X = \begin{bmatrix} \frac{(D-1)*(V_o + V_D)}{D * R_S + R_L * R_{GRet}} \\ \frac{R_{GRet} * (D-1) * (V_o + V_D)}{D * R_S + R_L + R_{GRet}} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Encontrado as variáveis de estado no ponto de operação, é necessário calcular o modelo para pequenos sinais, perturbando as variáveis de estado. Essa modelagem foi praticada de acordo em (JÚNIOR, 2017) que fornece (3.69).

$$\hat{X}(s) = (s * I - A_{med})^{-1} * B_{med} * \hat{U}(s) \quad (3.69)$$

$$\widehat{G}_{xu}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{U}(s)} = (s * I - A_{med})^{-1} * B_{med} \quad (3.70)$$

$$\widehat{G}_{xu}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{U}(s)} = \left\{ s * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{-R_L - D * R_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \right\}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{D-1}{L} & \frac{D-1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

$$\widehat{G}_{xu}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{U}(s)} = \begin{bmatrix} \frac{(L + C_{int} * L * R_{GRet} * s) * (D-1)}{L * [(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * D * R_S * R_{GRet} + C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (D * R_S + R_L + R_{GRet})]} \text{ igual a } a_{11} \\ \frac{R_{GRet} - D * R_{GRet}}{[(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * D * R_S * R_{GRet} + C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (D * R_S + R_L + R_{GRet})]} \text{ igual a } a_{21} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

Analisando (3.71), o item da primeira linha e primeira coluna informa a função de transferência da corrente no indutor em relação a tensão de saída ($\widehat{G}_{iL_{Vo}}(s)$). Já o item da segunda linha e primeira coluna determina a função de transferência da tensão de entrada em relação à tensão de saída ($\widehat{G}_{V_{GRet-Vo}}(s)$).

As funções de transferência das variáveis de estado associadas à razão cíclica foram determinadas assumindo a alteração na tensão de saída nula ($\hat{U}(s) = 0$) (JÚNIOR, 2017). Desta forma, tem-se:

$$\hat{X}(s) = (s * I - A_{med})^{-1} * B_d * \hat{D}(s) \quad (3.72)$$

$$\widehat{G}_{xd}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{D}(s)} = (s * I - A_{med})^{-1} * B_d = \begin{bmatrix} \widehat{G}_{iL_D}(s) \\ \widehat{G}_{V_{GRet}}(s) \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

$$\widehat{G}_{xd}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{D}(s)} = \left\{ s * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{-R_L - D * R_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \right\}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{(V_o + V_D) * (R_S + R_L + R_{GRet})}{L * (D * R_S + R_L + R_{GRet})} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

$$\widehat{G}_{xd}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{D}(s)} = \begin{bmatrix} \frac{(L + C_{int} * L * R_{GRet} * s) * (V_o + V_D) * (R_S + R_L + R_{GRet})}{L * [(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * D * R_S * R_{GRet} + C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (D * R_S + R_L + R_{GRet})] * (D * R_S + R_L + R_{GRet})} \\ \frac{R_{GRet} * (V_o + V_D) * (R_S + R_L + R_{GRet})}{[(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * D * R_S * R_{GRet} + C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (D * R_S + R_L + R_{GRet})] * (D * R_S + R_L + R_{GRet})} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

Na representação de (3.75) o item da primeira linha e primeira coluna, mostra a função de referência da corrente do indutor em relação a razão cíclica de chaveamento ($\hat{G}_{iL_D}(s)$). Já o elemento da segunda linha e segunda coluna, demonstra a função de transferência da tensão de entrada em relação a razão cíclica de chaveamento ($\hat{G}_{V_{GRet_D}}(s)$).

O grupo motor-gerador funciona como uma fonte de tensão, no qual sempre injeta tensões que são geradas pela máquina síncrona. Essa tensão necessita ser controlada para que não haja oscilações bruscas na entrada do conversor e prejudique seus componentes. O controle dessa tensão foi realizado de maneira indireta, controlando a corrente de entrada do conversor e assim possibilitando a extração máxima potência do sistema. Sendo assim, a função de transferência que permite controlar essa corrente é representada por $\hat{G}_{iL_D}(s)$. Fazendo uma simplificação na função de transferência desejada, representando com um valor nulo a resistência do interruptor (R_s) e a queda de tensão no diodo (V_D), a função se torna:

$$\hat{G}_{iL_D}(s) = \frac{\hat{G}_{iL_D}(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{(L + C_{int} * L * R_{GRet} * s) * V_o}{L * [(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (R_L + R_{GRet})]} \quad (3.76)$$

3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados as especificações, os dimensionamentos e a modelagem matemática do motor CC, da máquina síncrona, do retificador e do conversor Boost. Dimensionou-se os componentes que compõe cada dispositivo e apresentou algumas considerações realizadas para tal tarefa. A modelagem matemática foi realizada utilizando o modelo médio no espaço de estados, onde, determinaram-se as funções de transferência para cada elemento constituinte do sistema.

O objetivo de controlar o motor se dá na função de conseguir uma velocidade angular específica, a partir de uma tensão aplicada em sua armadura. Para isso, obteve-se a função $G_M(s)$ que especifica essas características do motor CC. No intuito de controlar a corrente de entrada do conversor *Boost*, corrente no indutor L , utilizou a função $\hat{G}_{iL_D}(s)$ que informa a variação da corrente i_L para variações da razão cíclica D de operação.

As funções $G_M(s)$ e $\hat{G}_{iL_D}(s)$ são necessárias para realização do controle do motor e do conversor *Boost* em malha fechada. Esse controle será detalhado no capítulo 4.

4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO SISTEMA

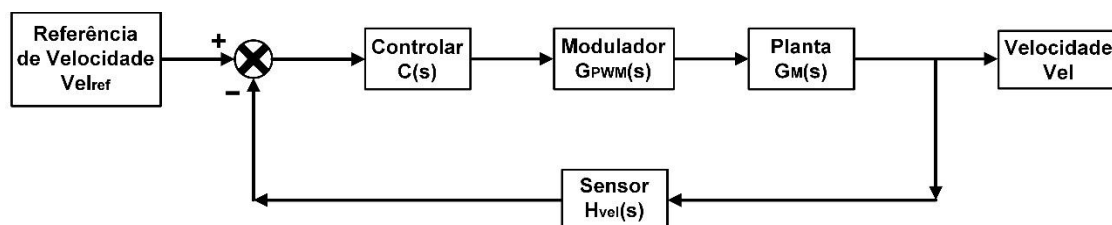
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão expostas as técnicas de controle utilizadas para controlar o motor de corrente CC e o conversor CC-CC Boost, utilizado para a extração de máxima potência do emulador eólico composto pelo grupo motor – gerador. O motor foi modelado e controlado para que respondesse, na sua velocidade, as características do vento impostas como referência. Já o conversor *Boost*, foi elaborado utilizando um algoritmo de MPPT, que permitiu extrair a máxima potência gerada controlando a corrente de entrada do conversor em diferentes condições de operações. Para implementação das estratégias de controle utilizou-se o microprocessador DSP modelo TMS320F28335 da Texas Instruments®, destacado pela sua alta performance no processamento de sinais digitais, possibilitando a modulação PWM (*Pulse With Modulate*) utilizado na técnica escolhida para o controle do motor CC e do conversor *Boost*.

4.2. COMPENSADOR DE VELOCIDADE NO MOTOR CC

A modelagem do motor CC foi realizada a partir de um controlador $C(s)$ em série com o modulador $G_{PWM}(s)$ e a planta $\hat{G}_M(s)$ com realimentação do sensor $H_{vel}(s)$, como é representado na Figura 4.1. A planta $\hat{G}_M(s)$ é a função de transferência do motor CC informada em (3.30). A planta de controle tem o objetivo de compensar o erro do valor de velocidade lido pelo sensor no sistema em relação a um valor de referência desejado e assim permitindo que o sistema responda da forma esperada.

Figura 4.1 – Diagrama de blocos que representa o controle do motor CC.



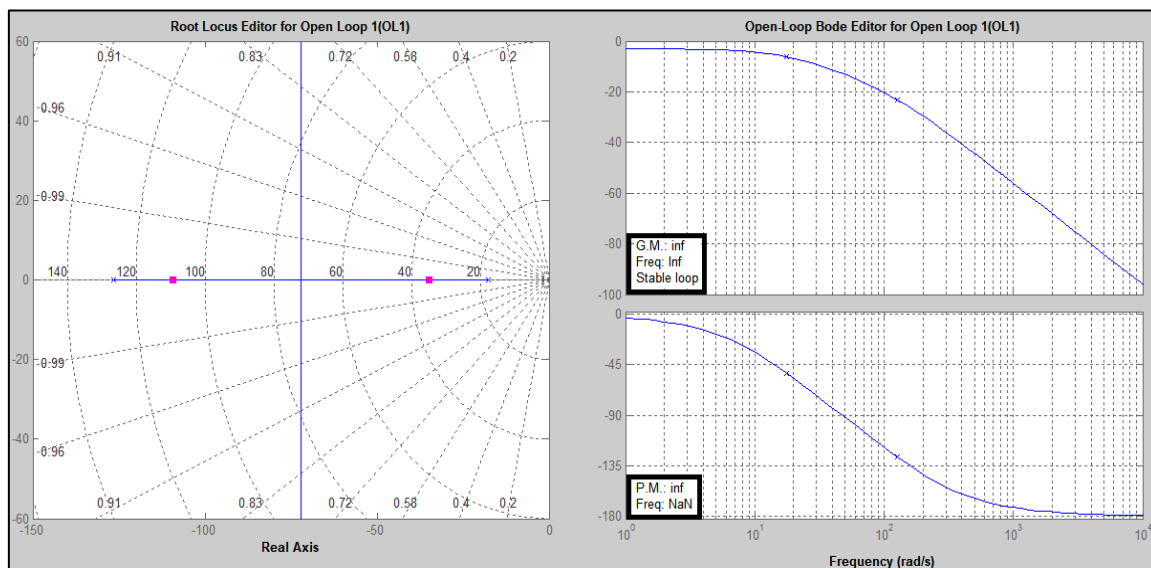
Fonte: Dados do próprio autor.

Examinando a Figura 4.1 foi projetado um compensador ($C(s)$) para o controle da velocidade angular do motor, no intuito do sistema responder a um sinal de referência desejado, que respeitasse suas características.

Para comprovar a estabilidade de um sistema, a margem de fase do mesmo deve permanecer entre 0° e 180° . Além do mais, com intenção desse sistema demonstrar baixo tempo de acomodação e ultrapassagem percentual (UP%) reduzida, é preciso verificar a frequência de passagem por 0 dB do mesmo (DORF & BISHOP, 2001), (OGATA, 2011).

A fim de mostrar o funcionamento do compensador projetado para o motor CC, o lugar geométrico das raízes do sistema e os diagramas de Bode sem controlador são apresentados na Figura 4.2.

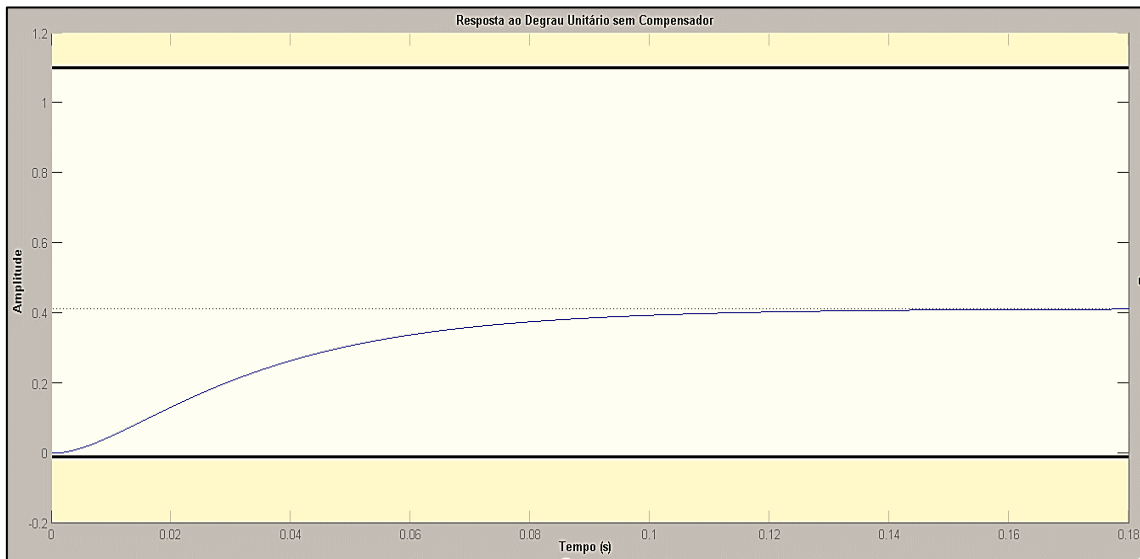
Figura 4.2 – Lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode do motor não controlado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Outro aspecto apresentado do sistema sem compensador, é a resposta do mesmo a um degrau unitário. Analisando o gráfico percebe-se que o sistema responde ao degrau de forma estável, porém não consegue chegar ao patamar desejado em um curto intervalo de tempo. A Figura 4.3 representa essa resposta.

Figura 4.3 – Resposta ao degrau unitário do motor CC sem compensador.



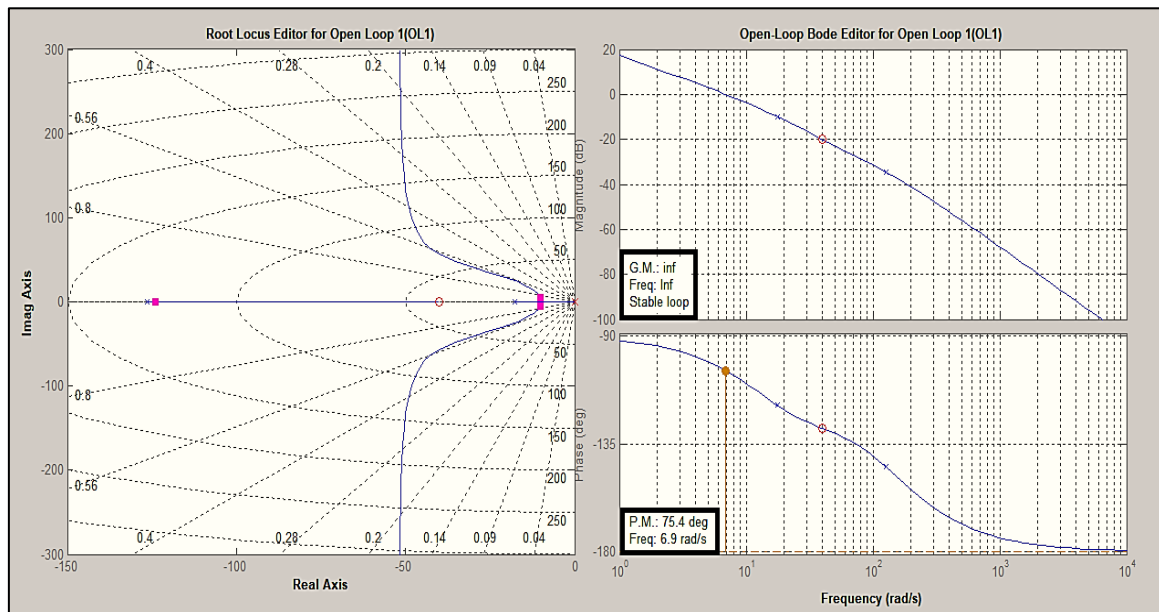
Fonte: Dados do próprio autor.

O controlador desenvolvido para atuar no processo de controle da velocidade angular do motor foi um compensador PI (Proporcional Integral). A partir de uma referência determinada, o controlador tem a função de equilibrar a diferença entre o sinal de referência imposta e o sinal de velocidade obtido no sistema. Assim, fica imposto a ele minimizar a zero o erro interno entre esses dois sinais na planta de controle do motor CC. O compensador projetado é mostrado em 4.1.

$$C_M(s) = 0,26 * \frac{(s + 40)}{s} \quad (4.1)$$

A inserção do compensador escolhido modificou o lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode do motor, mantendo dentre os requisitos de controle já mencionados, com uma margem de fase de 75,4°. Os novos gráficos compensados são mostrados na Figura 4.4.

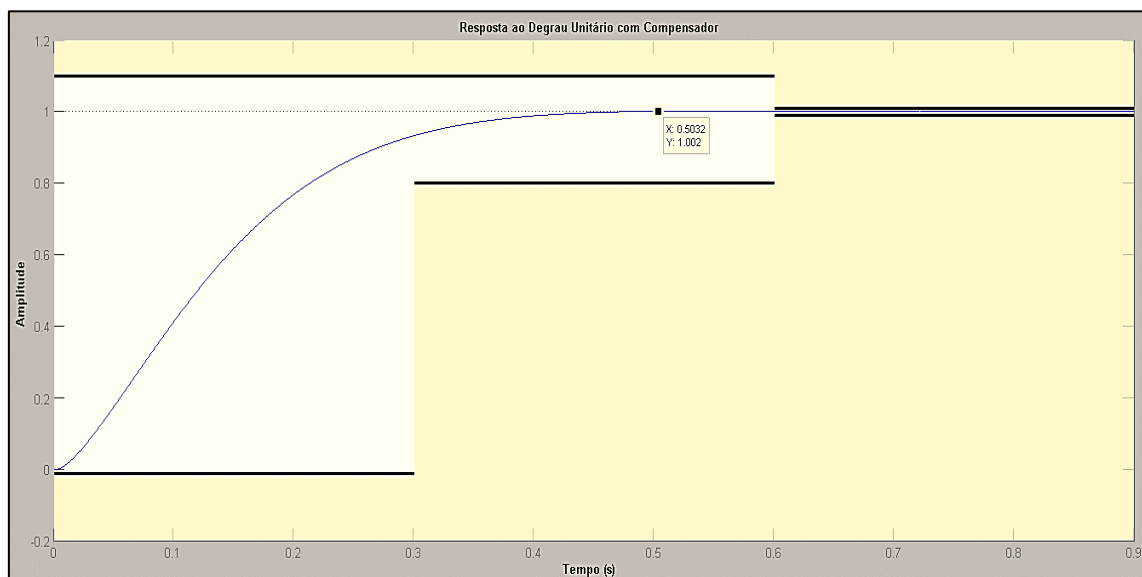
Figura 4.4 – Lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode do motor com compensador.



Fonte: Dados do próprio autor.

Mesmo não possuindo uma resposta rápida por causa da inércia do motor, o controlador no sistema permitiu o controle da maneira desejada do mesmo. A Figura 4.5 demonstra essa resposta do motor ao degrau unitário.

Figura 4.5 – Resposta ao degrau unitário com compensador.



Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 4.5 fica fácil perceber que a inserção do compensador otimizou a resposta do sistema tornando-o submisso às variações impostas nele. Ainda é possível observar que o motor consegue atingir o regime permanente em 0,5032s.

4.3. ESTRATÉGIA MPPT UTILIZADA NO CONVERSOR BOOST

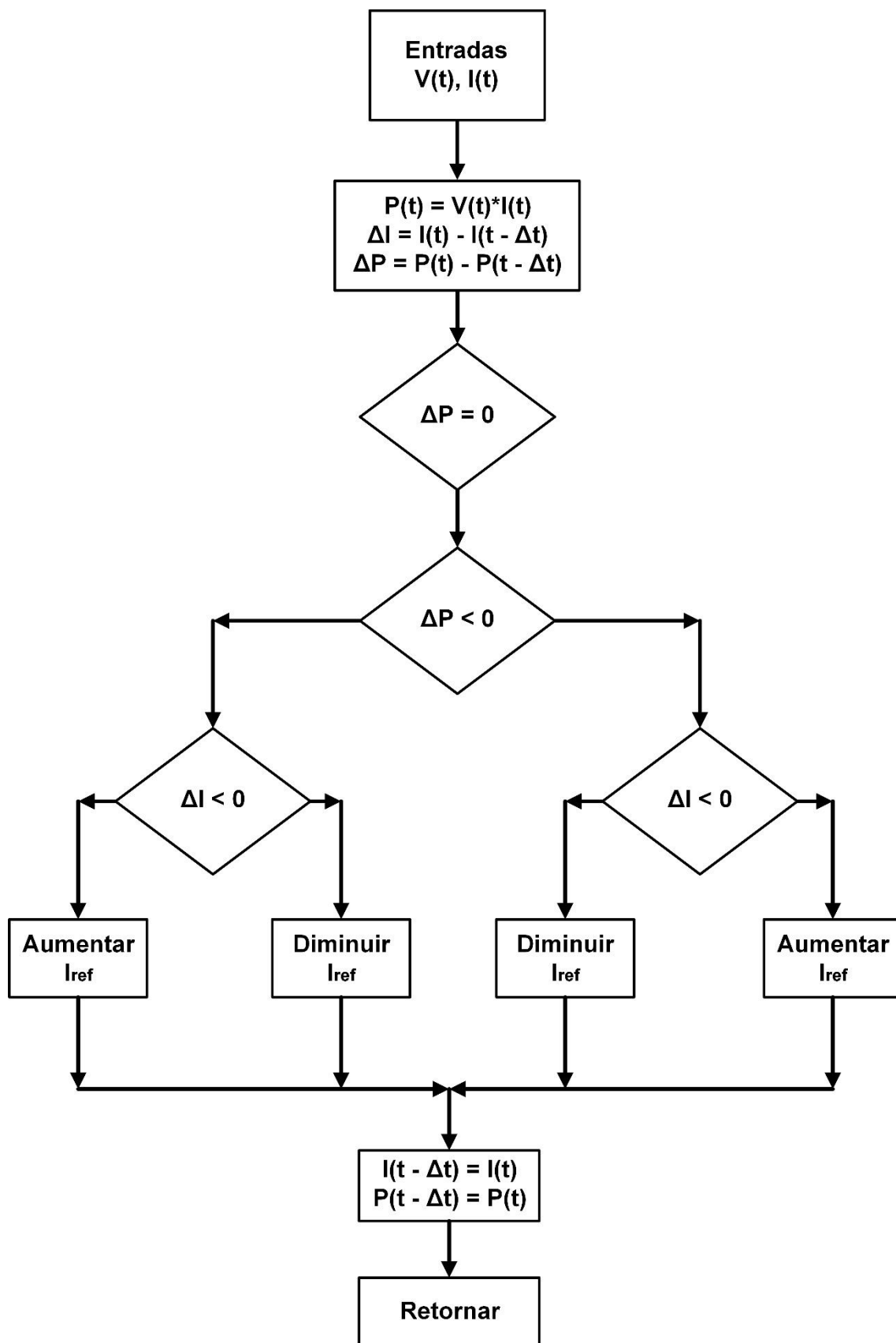
Como se fez o uso de uma máquina síncrona funcionando como gerador, suas características construtivas disponibilizam que para uma tensão de alimentação do campo fixa, diferentes valores de velocidades mecânicas no seu eixo fornecerão diferentes valores de tensões em seus terminais de saída. Como o vento é uma grandeza intermitente, e o motor CC está emulando essa grandeza, o eixo da máquina síncrona estará sempre com velocidade variável, consequentemente fornecendo tensões senoidais variáveis em seus terminais. Para diferentes níveis de operações é desejado a máxima potência disponível pelo sistema, e assim, um controle de suas grandezas foi realizado a partir da escolha das diversas técnicas de MPPT disponíveis.

Conforme discutido anteriormente, o método mais conhecido como “tabela de buscas”, mesmo sendo um método muito eficaz, possui o inconveniente de necessitar de muitas grandezas mecânicas e elétricas, o que aumenta o custo do protótipo a inserção de equipamentos de medição de todos os parâmetros necessários para a construção da tabela de buscas.

O segundo método de rastreamento de ponto de máxima potência, conhecido pelo princípio de “perturbar e observar” necessita apenas grandezas elétricas para realização do seu controle, deixando o custo do protótipo mais baixo e facilitando seu controle.

Como essa técnica é embasada em uma comparação de potência para diferentes valores de velocidade, foi realizada a leitura da tensão e corrente de entrada do conversor *Boost*. Tendo conhecimentos dos valores dessas variáveis, calcula-se a potência de saída do grupo máquina-gerador ($P_{Gret} = V_{Gret(n)} * i_{L(n)}$) e compara esse valor com a potência fornecida no instante anterior. Caso o incremento de corrente provoque um aumento de potência, o ponto de operação do sistema é deslocado nesse sentido. Caso contrário, o novo ponto de operação do sistema será deslocado no sentido contrário. A Figura 4.6 demonstra o fluxograma do algoritmo da técnica MPPT P&O utilizada.

Figura 4.6 – Fluxograma do algoritmo MPPT P&O utilizado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Um item importante na análise do comportamento da corrente na utilização de técnicas de MPPT se dá na escolha do passo de perturbação (Δi_L). A escolha de um passo maior o sistema chegará ao seu ponto máximo mais rápido, porém o mesmo ficará oscilando em torno do ponto máximo um tempo maior, causando maiores perdas de energia. Escolhendo um passo menor, o sistema irá demorar mais para encontrar seu ponto de máxima potência, mas a oscilação é menor, causando menos perdas.

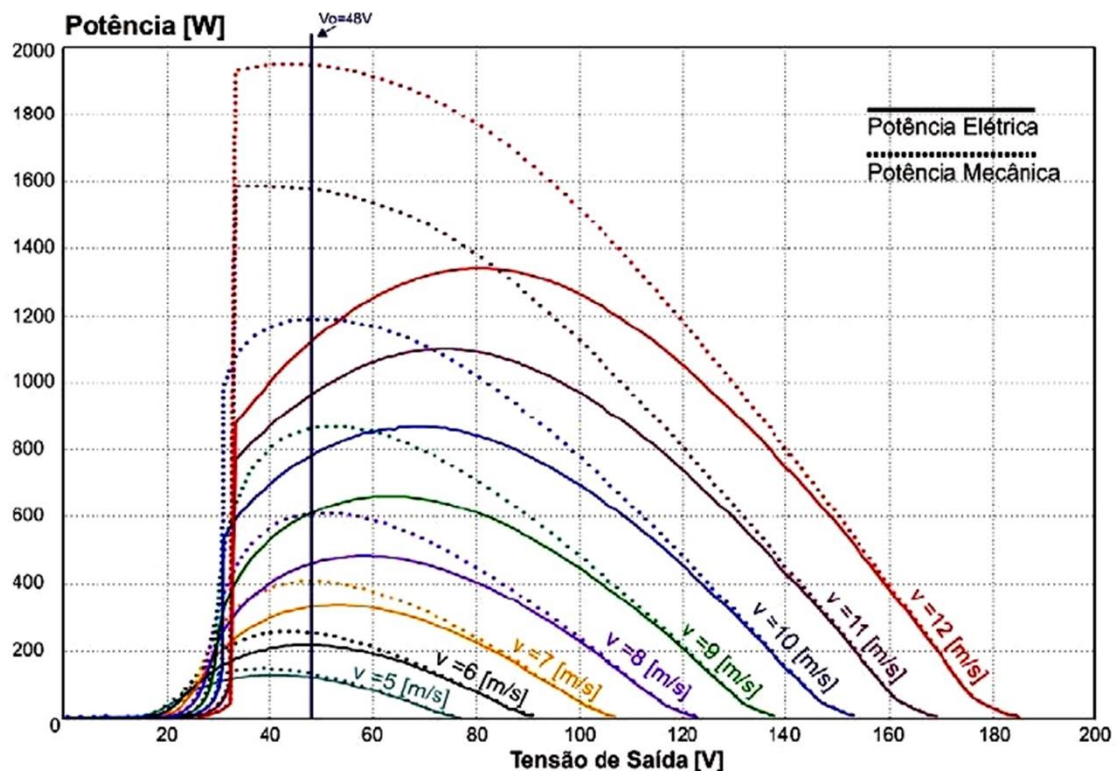
4.4. CARACTERÍSTICAS DE MÁXIMA POTÊNCIA EM UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE

Conhecendo os fundamentos da máxima transferência de energia e percebendo que o emulador eólico apresenta particularidades no fornecimento de potência, na qual é possível identificar a ocorrência de um valor máximo, torna praticável a aplicação de uma estratégia de acompanhamento desses valores de potência, a partir de um conversor CC. Esse processo é realizado através da alteração nos valores da razão cíclica baseado na leitura da energia extraída do sistema (TIBOLA, 2009). Do mesmo modo que a potência passa por um valor máximo para determinada tensão, consequentemente, sua corrente também terá um valor máximo nesse instante. Desta forma, ambas grandezas podem ser controladas no sistema eólico respeitando suas características construtivas.

Segundo (TIBOLA, 2009), os benefícios e os infortúnios de um sistema com e sem rastreamento serão apresentados a partir de simulações computacionais e gráficos, que exibem as características desse sistema, ainda complementando um referencial teórico para uso em projetos relacionados. Os mesmos podem ser obtidos para qualquer outra particularização de sistemas eólicos, especialmente de pequeno porte.

O primeiro teste mostra como o sistema possui um valor mínimo de tensão que o permite começar a entrar em operação. Esse gráfico é mostrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Gráfico informando valores mínimo e máximo de um sistema eólico de pequeno porte.



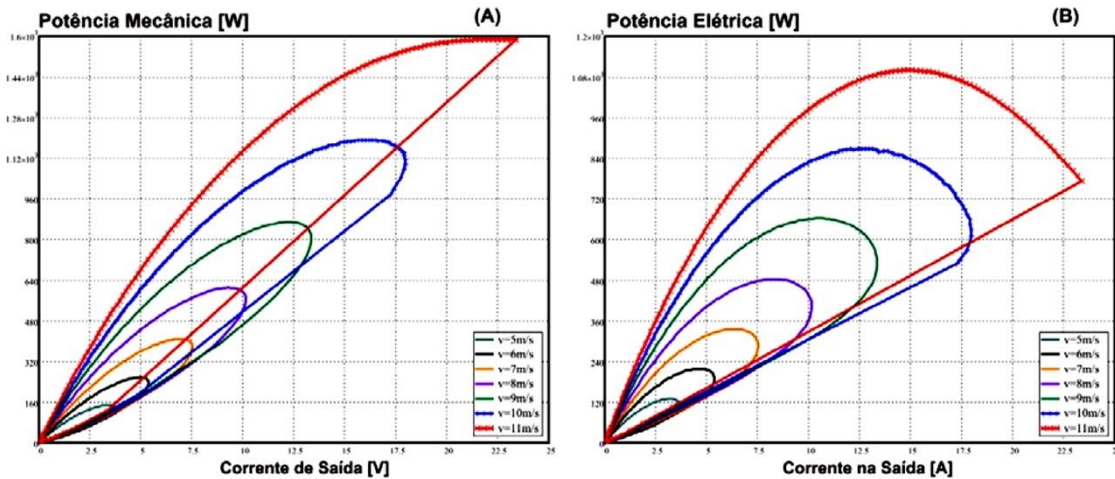
Fonte: (TIBOLA, 2009).

Analisando a Figura 4.7, os resultados para variação da tensão de saída, na ponte retificadora, realizados entre 0 e 200 volts para diferentes velocidades do vento obtém-se alguns resultados. O primeiro mostra um desempenho semelhante tanto para grandezas mecânicas quanto para grandezas elétricas na passagem por um ponto de valor máximo. O segundo informa o caso de ambas potências possuírem um valor inicial para seu crescimento, fato esse, que o sistema não consegue entregar potência pois não existe rotação suficiente na máquina. Como terceiro ponto, analisando, para este caso, a tensão de 48 volts as grandezas elétricas possuem um valor de potência máxima apenas para baixas velocidade, porém, a potência mecânica possui em todas as velocidades seu valor máximo nesse ponto. O gráfico permite analisar que os aerogeradores possuem um intervalo de tensão, no qual, demonstram uma melhor performance para qualquer valor de vento, neste caso, ocorrendo entre 48 e 100 volts para extração de energia (TIBOLA, 2009).

Como o sistema irá controlar a corrente de entrada do conversor CC-CC, um gráfico importante para esse controle seria a corrente injetada na sua entrada em relação

a potência elétrica do sistema. Esse gráfico é demonstrado na Figura 4.8. O mesmo se torna importante porque ele define qual valor de corrente o sistema começa a gerar energia e a partir do qual o sistema não responde mais aos incrementos de corrente, tornando o sistema instável.

Figura 4.8 – Potência elétrica e mecânica em relação a corrente de saída.



Fonte: (TIBOLA, 2009).

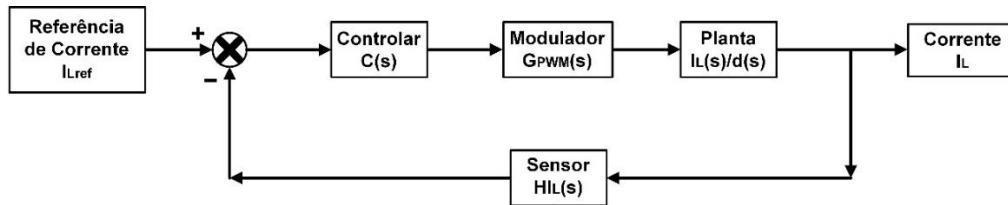
O gráfico da Figura 4.8, teve como variação da velocidade do vento 5 m/s à 11 m/s, acrescidos, um a um, metros por segundo. Um detalhe importante no gráfico se dá pelo fato que controle da corrente da máquina síncrona, aplicada em sistemas eólicos se torna mais complexo do que o controle da tensão. Isso ocorre porque a corrente não possui um comportamento linear. A curva possui um valor máximo, porém, seja qual for o incremento imposto nesse valor máximo, pode causar a instabilidade do sistema. Como o gerador síncrono é constituído por características que o definem como sendo uma fonte de tensão, seu controle necessita ser um pouco mais apurado para controlar uma grandeza que está sendo gerada. Dessa forma o controle da corrente se torna um pouco mais delicado devido sua instabilidade, sendo, porém implementável.

4.5. COMPENSADOR DE CORRENTE DO CONVERSOR BOOST

A técnica de modelagem do conversor CC-CC consistiu em um controlador $C(s)$ em cascata com o modulador $G_{PWM}(s)$ e a planta $i_L(s)/d(s)$ com realimentação do sensor $H_v(s)$. A planta do sistema foi demonstrada em (3.76).

A planta de controle tem o objetivo de compensar o erro do valor de corrente lido pelo sensor no sistema em relação a um valor de referência desejado. O esquemático do modelo de planta utilizado é representado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Diagrama de blocos representando o controle de corrente de entrada.



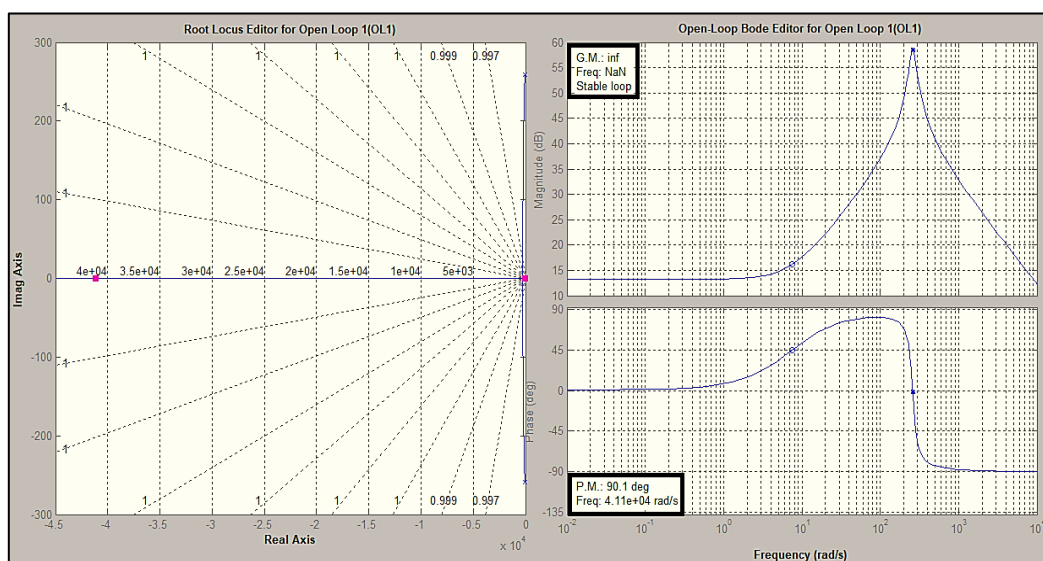
Fonte: Dados do próprio autor.

Simplificando o diagrama de blocos da Figura 4.9, considerando o modulador $G_{PWM}(s)$ e o sensor $H_V(s)$ com valores unitários, considerando as perdas no indutor (R_L) como sendo de $0,5\Omega$ e substituindo esse valor em (3.76), a planta $\hat{G}_{iL_D}(s)$ se torna:

$$\hat{G}_{iL_D}(s) = \frac{\hat{G}_{iL_D}(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{0,8281 * s + 6,244}{2,06810^{-5} * s^2 + 0,0009841 * s + 1,285} \quad (4.2)$$

No intuito de mostrar como o controlador desenvolvido interfere na dinâmica do sistema, serão demonstrados o lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode da planta não controlada e posteriormente os mesmos diagramas para a planta controlada. A Figura 4.10 informa os dados da planta não controlada.

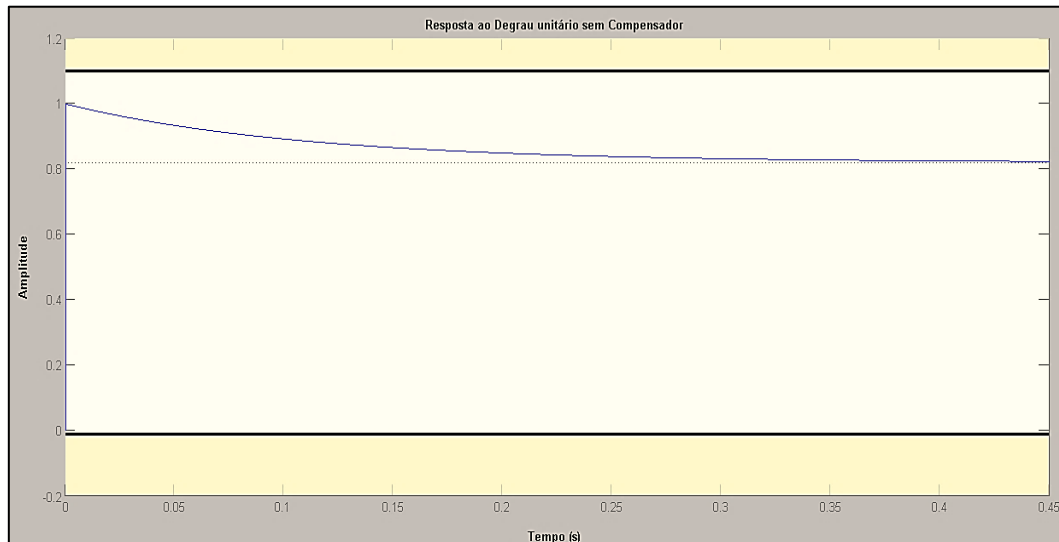
Figura 4.10 – Lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode da planta não controlada.



Fonte: Dados do próprio autor.

Outro gráfico que relata a estabilidade do sistema, mesmo sem o compensador, é a resposta ao degrau unitário. O mesmo mostra como o sistema se comporta a uma perturbação e sua capacidade de compensar esse erro. A Figura 4.11 mostra a resposta ao degrau unitário no sistema não controlado.

Figura 4.11 – Resposta ao degrau unitário do sistema não controlado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Percebe-se que tanto na Figura 4.10 quanto na Figura 4.11 as respostas do sistema não controlado se encaixam dentre os valores de referência para um sistema estável, porém, com valores podendo ser otimizados.

No intuito de otimizar a resposta do sistema, foi desenvolvido um compensador que respeitasse a dinâmica do sistema e que fornecesse uma resposta rápida e eficaz no processamento da corrente.

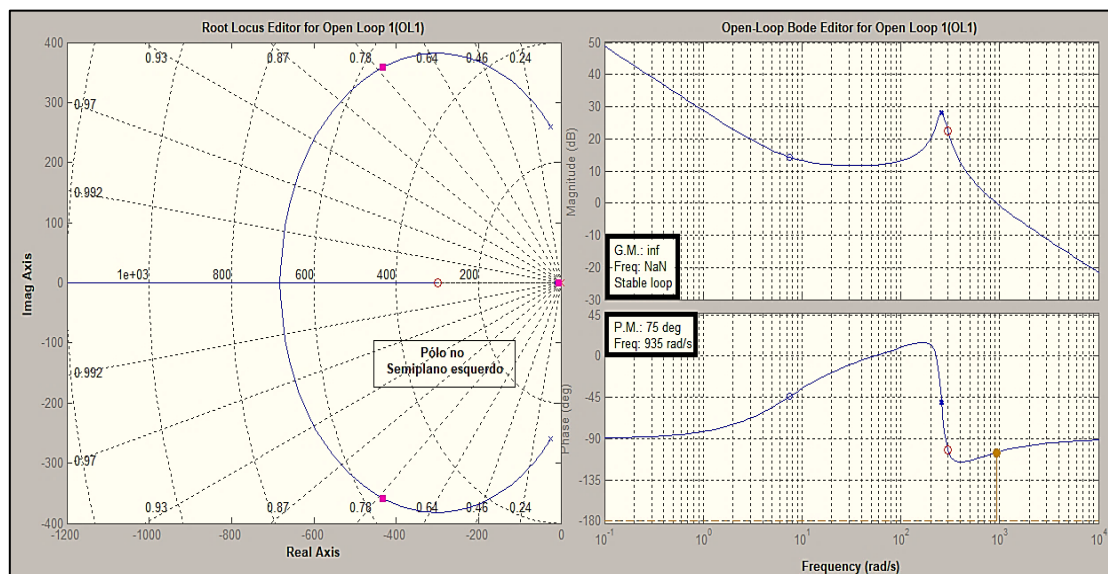
O uso do compensador na planta do conversor basicamente trabalha no intuito de corrigir o erro estático causado pela resposta do sistema em relação a referência desejada. No compensador, esse erro estático é corrigido inserindo um pólo na origem da função transferência. A inserção de um zero na função de transferência do compensador, proporciona melhorias de resposta transitória no sistema em malha fechada, permitindo que o sistema se torne mais estável. Diante disso, o compensador mais adequado para o controle da corrente do conversor *Boost* deve possuir um pólo na origem e um zero.

A função de transferência do compensador é apresentada em (4.3).

$$C_{iL}(s) = 0,02 * \frac{(s + 300)}{s} \quad (4.3)$$

Os componentes da função de transferência do compensador como, o ganho, o zero e o pólo, foram adaptados para melhor atender os requisitos do sistema, respeitando suas características. A Figura 4.12 demonstra o lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode com compensador na planta do sistema.

Figura 4.12 – Lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode com compensador no sistema.



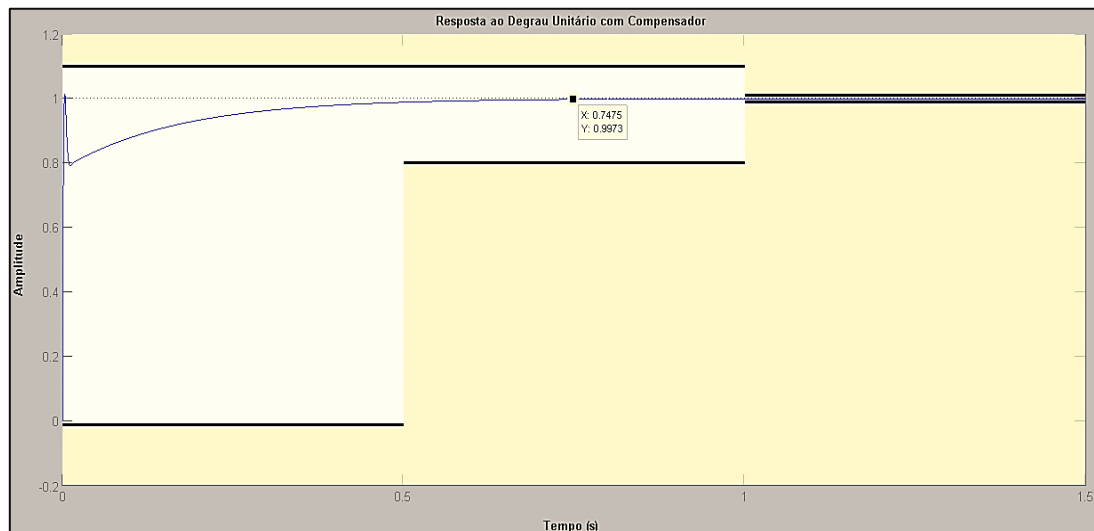
Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 4.12, percebe-se que o sistema é estável para a escolha do polo escolhido, pois, este se encontra no semiplano esquerdo. Com a inserção do compensador projetado a nova margem de fase do sistema passou a ser de 75°. Esse valor de margem de fase fica dentro de um dos critérios de projeto adotado como sendo a margem de fase maior que 45°, na qual proporciona resposta ao degrau unitário com melhor ultrapassagem percentual. O segundo critério adotado foi a frequência de passagem por 0 dB menor que a frequência de chaveamento, aproximadamente 1/10, no intuito de garantir que o sistema funcione como um filtro para ruídos em alta frequência e grande o suficiente para determinar uma resposta transitória mais rápida.

Ao empregar o controlador PI mostrado em (4.3) o sistema passou a ter uma resposta robusta e precisa dentro das suas características de resposta, garantindo assim, que a corrente de entrada do conversor *Boost* acompanhasse os degraus de referência de

corrente impostos pelo MPPT sem que ocorresse perda de potência. Esse aperfeiçoamento é apresentado na Figura 4.13, que representa a resposta do sistema ao degrau unitário. Analisando a figura, percebe-se que o sistema assume o regime permanente no tempo de 0,7475s.

Figura 4.13 – Resposta do sistema com compensador ao degrau unitário.



Fonte: Dados do próprio autor.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os compensadores projetados para o motor e para o conversor Boost. Foram relatadas as situações iniciais e posteriores da inclusão dos controladores nas malhas de controle de cada dispositivo, validando seu desenvolvimento.

Também foram apresentadas as estratégias utilizadas para a extração de máxima potência do sistema com a utilização de um algoritmo MPPT, levando em consideração as características construtivas do grupo motor-gerador e o desenvolvimento de um compensador que maximizou as respostas do sistema chegando a um patamar desejado.

Destaca-se a utilização de método de extração de máxima potência P&O clássico especificado na literatura que possibilitou o sistema funcionar dentro dos seus limites, não danificando os princípios de operação das máquinas e fornecendo resultados com maior credibilidade, assemelhando a sistemas de operação em escala real.

O capítulo 5 irá demonstrar os resultados de simulação e experimentais que validarão as estratégias de controle apresentadas no presente capítulo.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

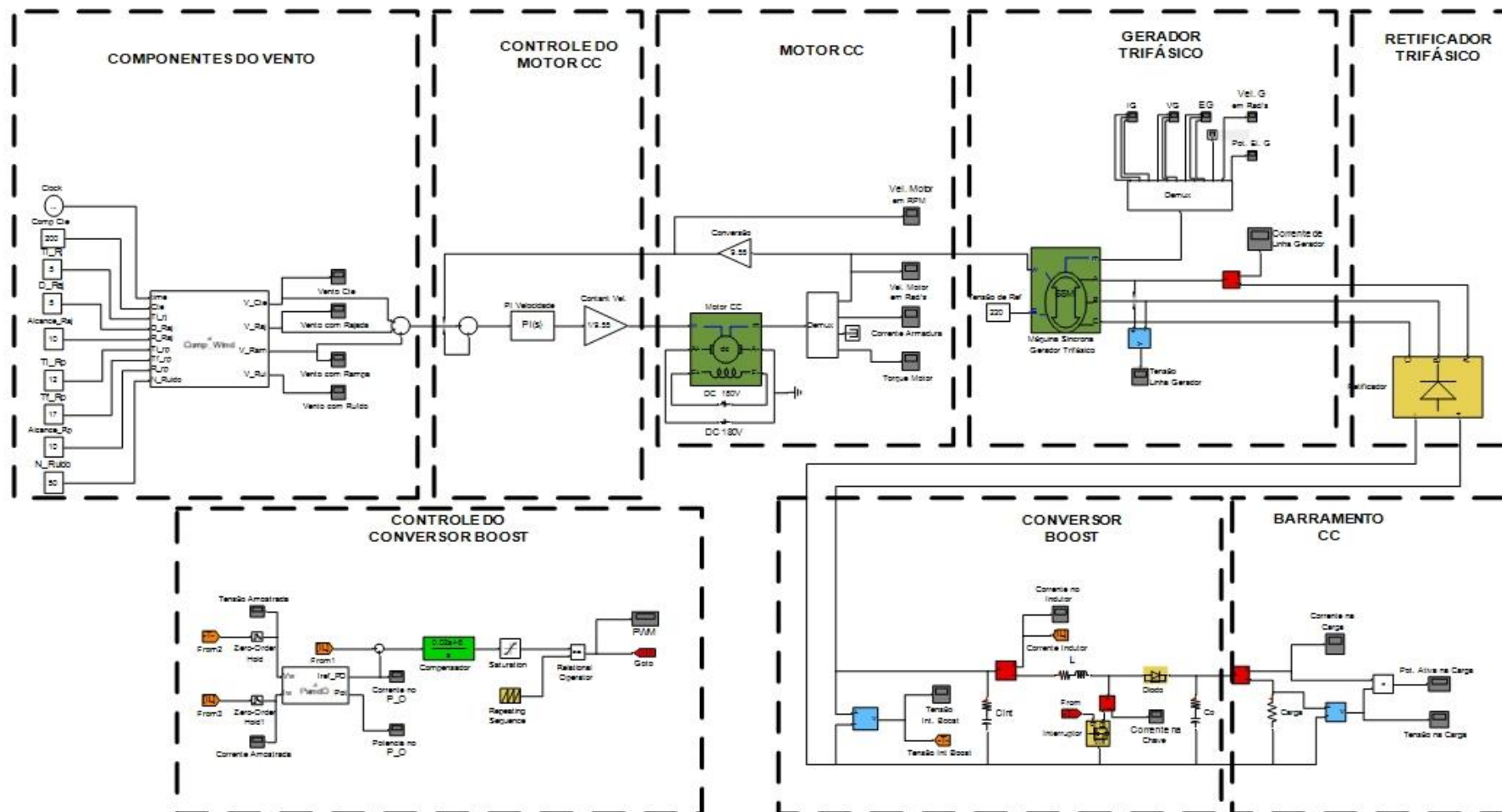
Neste capítulo serão apresentados os principais resultados de simulação e experimentais do sistema proposto. Os efeitos das simulações para o controle de corrente em malha aberta e fechada, as formas de onda nos terminais da máquina síncrona, a saída do retificador trifásico e as formas de operação do conversor CC-CC Boost foram exibidos para algumas situações impostas para o sistema. Já os resultados experimentais apontaram o funcionamento do protótipo em situações semelhantes que comprovasse o funcionamento do mesmo.

O sistema completo é composto por: um motor CC, uma máquina síncrona, um retificador trifásico não controlado e um conversor *Boost*. As simulações foram realizadas de modo a reproduzir diversas condições de operação dos aerogeradores. O protótipo foi submetido a situações semelhantes à da simulação, respeitando as limitações de cada componente utilizado, validando sua estrutura em comparação com os resultados computacionais obtidos.

5.2. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA

A Figura 5.1 apresenta o circuito de potência juntamente com a estratégia de controle do sistema completo na plataforma computacional utilizada.

Figura 5.1 – Circuito de potência e diagrama de controle na plataforma computacional Matlab®.



Fonte: Dados do próprio autor.

O sistema será dividido em cinco partes: estudo das componentes do vento, motor de corrente contínua, máquina síncrona, retificador trifásico e conversor *Boost*.

5.2.1. COMPONENTES DO VENTO

No intuito de analisar os distúrbios provocados pelo vento nos aerogeradores, foram elaboradas as formas de ondas que representam os principais tipos do vento, que são elas: constante, rajada, rampa e ruído. O valor resultante das quatro representantes do vento pode ser calculado em (5.1). Essas formas de ondas relacionam as grandezas de tensão e tempo. A tensão será interpretada pelo controle do motor como um nível de velocidade que o motor deverá alcançar, emulando assim, as perturbações causadas nas turbinas eólicas.

$$V_w = V_m + V_{rp} + V_{rj} + V_{rd} \quad (5.1)$$

Onde:

V_m - Velocidade média do vento;

V_{rp} - Componente em rampa;

V_{rj} - Componente em rajada;

V_{rd} - Componente em ruído.

A representante do vento constante foi interpretada como um sinal de tensão constante imposta pelo usuário, representado como um sinal constante na velocidade da máquina. Em (5.2) representa essa componente.

$$V_m = k \quad (5.2)$$

As componentes rajada, rampa e ruído foram modeladas de acordo com (ANDERSON & BOSE, 1983). Suas formas de onda são esquematizadas de acordo com cada equacionamento a seguir.

A componente rajada é demonstrada em (5.3) e (5.4).

$$V_{rj} = \begin{cases} 0 & t < T_{irj} \\ V_{rj} & T_{irj} < t < T_{irj} + T_{rj} \\ 0 & t > T_{irj} + T_{rj} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$V_{rj} = \left(\frac{R_{max}}{2} \right) \cdot \left\{ \left\{ 1 - \cos 2\pi \left[\left(\frac{t}{T_{rj}} \right) - \left(\frac{t_{irj}}{T_{rj}} \right) \right] \right\} \right\} \quad (5.4)$$

Onde:

t - Tempo;

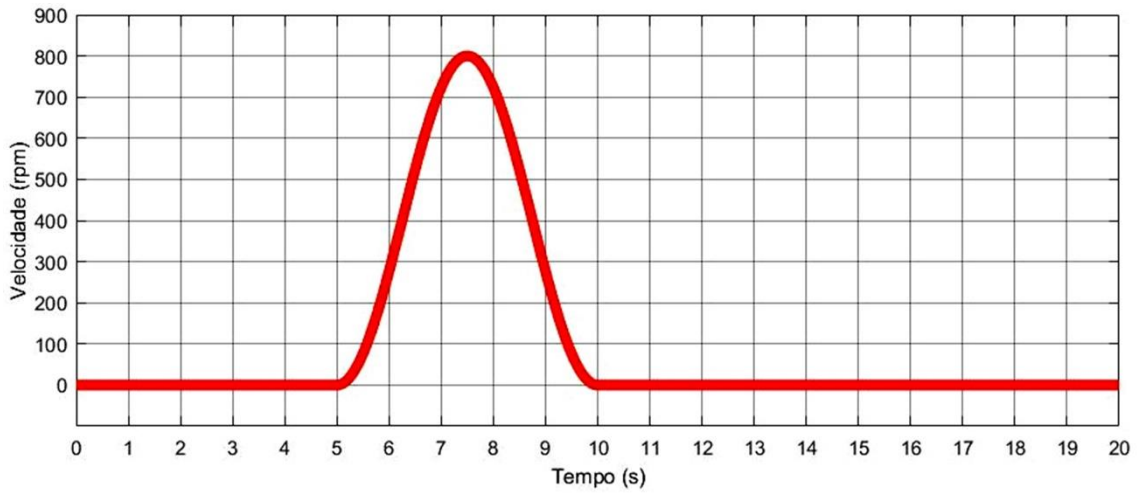
T_{irj} - Tempo inicial da componente rajada;

T_{rj} - Duração da componente rajada;

$R_{rj_{max}}$ - Valor máximo da componente rajada.

A resposta gráfica para a componente rajado é demonstrada na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Componente rajada do vento.



Fonte: Dados do próprio autor.

No gráfico da Figura 5.2, percebe-se que a componente rajada teve início no tempo de cinco segundos com seu término em dez segundos. Sua amplitude alcançou a velocidade de oitocentos metros por segundo, definindo bem a componente rajada do vento.

A componente rampa é definida de acordo com (5.5) e (5.6).

$$V_{rp} = \begin{cases} 0 & t < t_{irp} \\ V_{rp} & t_{irp} < t < t_{frp} \\ 0 & t > t_{frp} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$V_{rp} = R_{max} \cdot \left(1 - \frac{(t - t_{frp})}{(t_{irp} - t_{frp})} \right) \quad (5.6)$$

Onde:

t - Tempo;

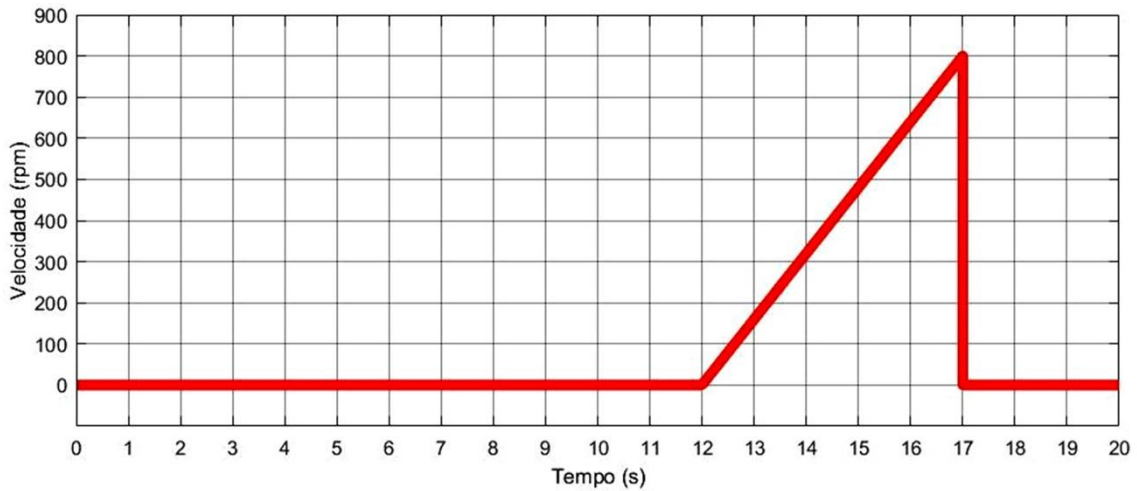
T_{irp} - Tempo inicial da componente rampa;

T_{frp} - Tempo final da componente rampa;

Rrp_{max} - Valor máximo da componente rampa.

A forma de onda da componente rampa é informada na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Componente rampa do vento.



Fonte: Dados do próprio autor.

A componente rampa, demonstrada na Figura 5.3, teve duração de cinco segundos, começando em doze segundos e terminando em dezessete segundos. Seu valor máximo chegou na velocidade de oitocentos metros por segundo, caindo abruptamente a zero logo em seguida, especificando a componente rampa do vento.

Analisando as componente rajada e rampa, percebe-se que ambas ocorrem em um intervalo de tempo definido. Na prática esses intervalos de tempo não podem ser previstos, já que o vento varia sua intensidade e direção de forma irregular. Por isso, para se analisar tais componentes e suas causas no sistema foi estipulado um tempo inicial e final, informando ao controle quando cada ação será realizada.

Por fim, a componente ruído é equacionada da seguinte maneira.

$$V_{rd} = 2 \sum_{i=1}^N [S_v(W_i) \Delta W]^{(\frac{1}{2})} \cos(W_i \cdot t + \phi_i) \quad (5.7)$$

$$W_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta W \quad (5.8)$$

$$S_v(W_i) = \frac{2K_n F^2 |W_i|}{\pi^2 \left[1 + \left(\frac{FW_i}{\mu\pi}\right)^2\right]^{\frac{4}{3}}} \quad (5.9)$$

Onde:

ΔW - Variação de velocidade [rad/s];

ϕ_i - Variável randômica com densidade de probabilidade uniforme no intervalo de 0 a 2π ;

K_n - Coeficiente de arrasto da superfície;

F - Escala de turbulência;

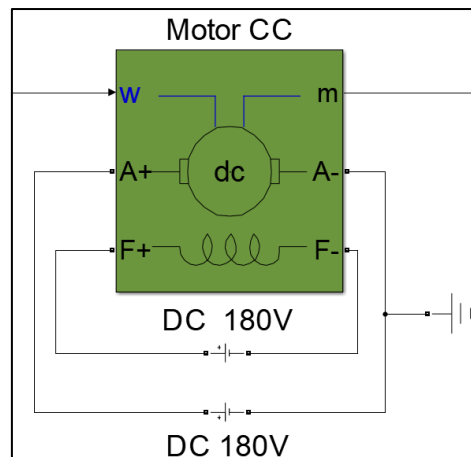
N - Limite do somatório

Como a componente ruído é composta por um sinal variável e empírico, a variável N apresentada em (5.7) foi especificada no valor de cinquenta. Esse valor foi estabelecido por meio de análise, comprovando que esse valor representou um bom resultado para o sistema.

5.2.2. MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

A Figura 5.4 mostra o modelo de motor de corrente contínua utilizado na simulação computacional.

Figura 5.4 – Modelo do motor CC utilizado do software de simulação.



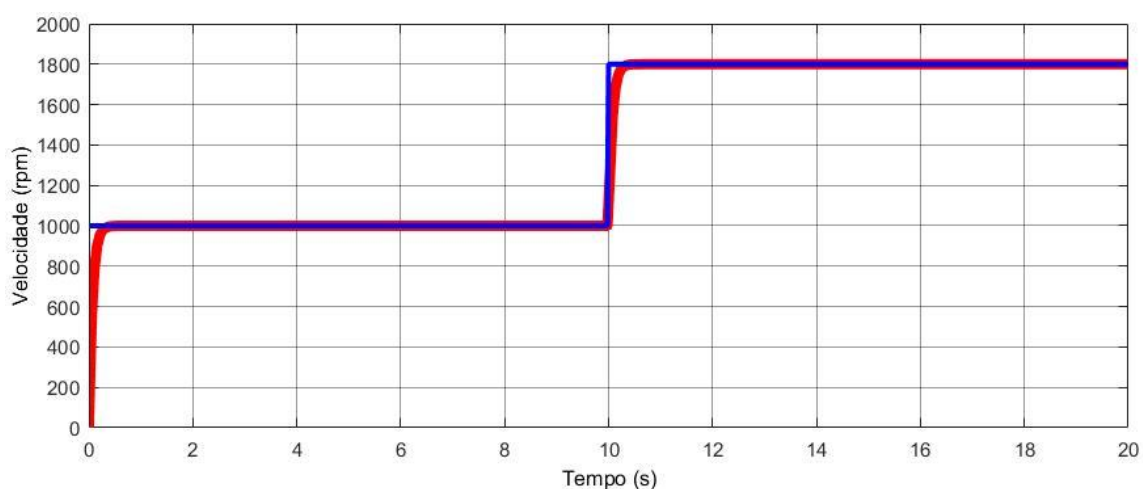
Fonte: Dados do próprio autor.

O esquemático da Figura 5.4 demonstra como o modelo do motor CC funciona, no qual cada variável representa uma funcionalidade. A variável “ w ” representa o sinal no qual será controlado, que nesse caso foi a velocidade da máquina. Os termos “ $A+$ ” e “ $A-$ ” representam a alimentação da armadura do motor, “ $F+$ ” e “ $F-$ ” informam sua tensão de campo. O fator “ m ” expressa os principais parâmetros de medição do motor, que são: velocidade, corrente na armadura, corrente de campo e torque.

Como o motor foi utilizado com excitação independente em seu campo, o controle de velocidade ocorreu a partir da variação da tensão de armadura em uma fonte de tensão controlada, conectada em série com sua resistência e indutância. Assim, sua velocidade será proporcional à tensão aplicada em sua armadura.

A fim de avaliar o controlador PI projetado para o controlar a tensão entregue na armadura do motor, foi realizada a análise do controle estipulando um nível de tensão, comparando a resposta do controlador ao acompanhamento da referência estipulada. A Figura 5.5 mostra o resultado no controlador operando.

Figura 5.5 – Velocidade de rotação controlada do motor CC.



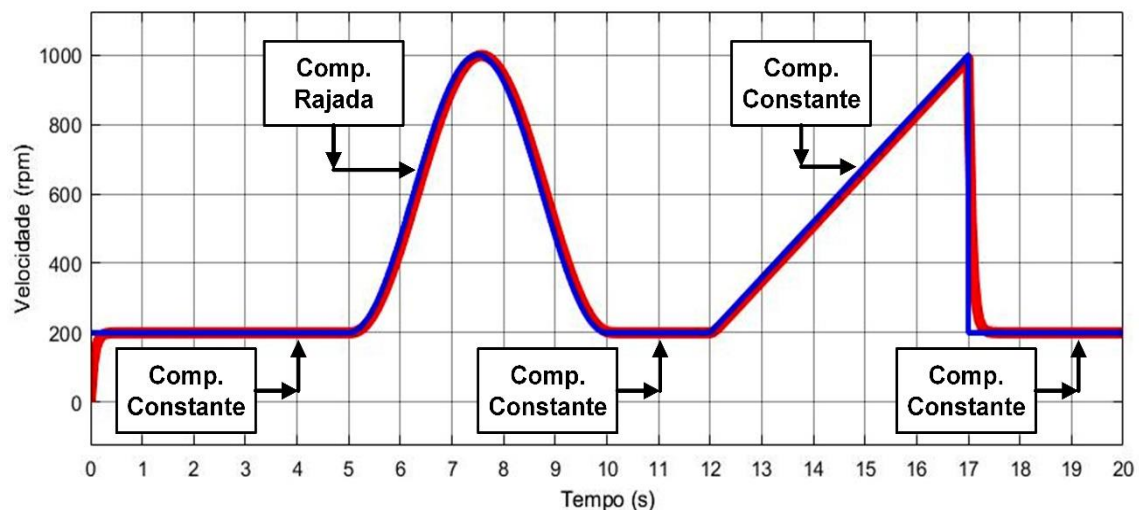
Fonte: Dados do próprio autor.

O gráfico da Figura 5.5, mostra o controlador projetado atuando no controle da velocidade de rotação do motor CC (estipulada na cor vermelha) em uma referência (definida na cor azul) de 1000 rpm até o tempo de dez segundos e logo após esse tempo sofrendo um degrau de velocidade, alcançando seu valor nominal de 1800 rpm. Analisando o gráfico fica claro que o controle da máquina foi realizado de forma satisfatória, respeitando a estrutura da mesma e alcançando a velocidade desejada.

Após comprovar o funcionamento do controlador foi estipulado ao motor os sinais provenientes do vento. Esses sinais emulam as características que o vento provoca nos aerogeradores resultando em um estudo em escala laboratorial.

A forma de onda que representa as principais características do vento, emuladas pelo funcionamento do motor é demonstrada na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Motor emulando as componentes do vento.



Fonte: Dados do próprio autor.

5.2.3. MÁQUINA SÍNCRONA

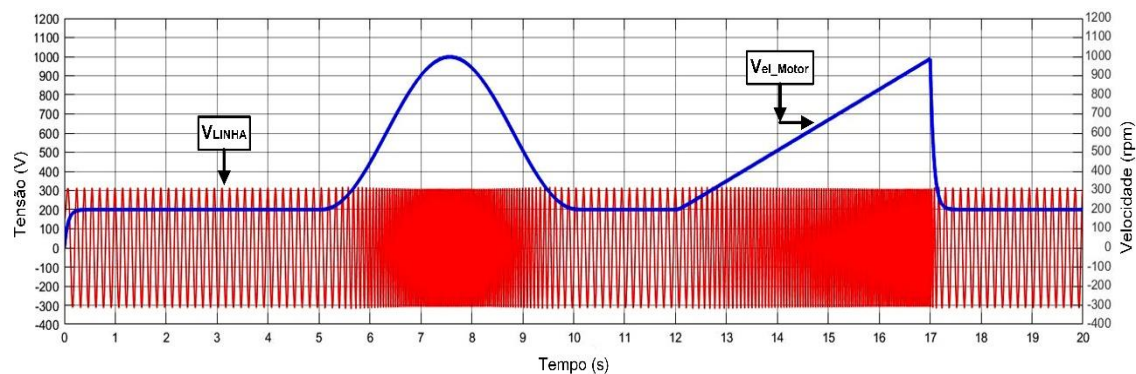
A máquina síncrona será utilizada como gerador síncrono já que seu eixo será conectado ao eixo do motor CC através de um acoplamento mecânico. Assim, todo movimento realizado pelo motor irá ser refletido também no gerador. O gerador síncrono foi estudado com sua interligação realizada na forma delta gerando uma tensão de 220V em condições nominais.

Como a máquina síncrona gera uma tensão com amplitude e frequência variáveis a partir do nível de velocidade do seu rotor, a máquina só irá entregar uma tensão com valores nominais de amplitude e frequência quando seu rotor estiver em velocidade nominal. Analisando tal característica, como a velocidade irá variar em alguns intervalos de tempo, para a interpretação das características do vento, características nominais de tensão geradas pela máquina serão verificadas em curtos intervalos de tempo.

Desta forma, não foi aplicado nenhum controle na máquina síncrona já que a potência será processada pelo conjunto composto pelo retificador trifásico e conversor CC-CC conectado nos terminais do gerador síncrono.

A Figura 5.7 mostra a variação em uma das três fases de tensão na saída da máquina síncrona.

Figura 5.7 – Tensão gerada entre duas fases da máquina síncrona.

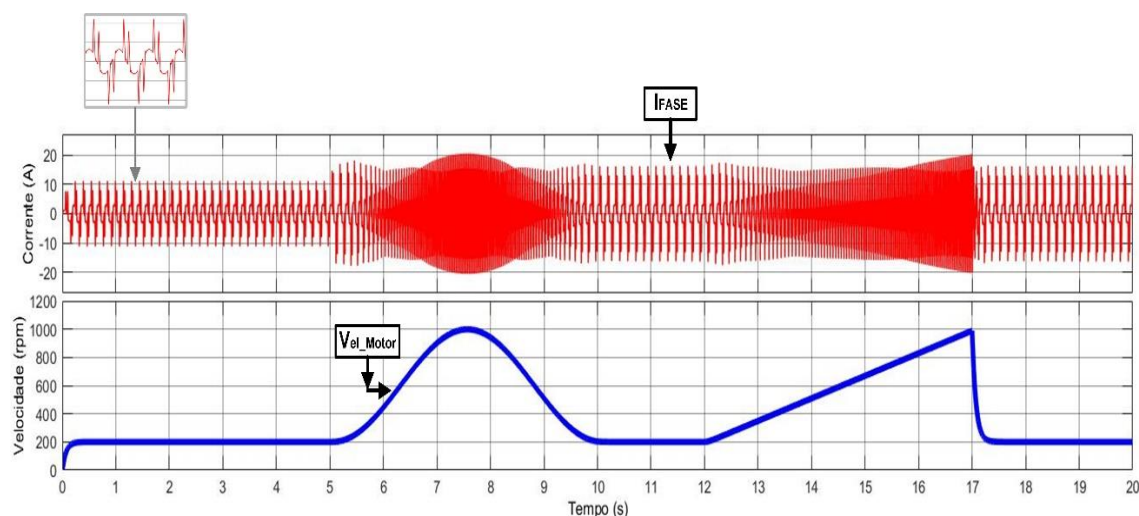


Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 5.7, nota-se que a tensão em uma das fases tem o comportamento esperado de uma máquina síncrona, na qual altera sua frequência com o aumento de velocidade do motor CC, que tem seus eixos solidários. Percebe-se também uma pequena oscilação em sua amplitude com a variação da velocidade.

A Figura 5.8 mostra a corrente resultante, em uma das fases, nos terminais de saída da máquina síncrona.

Figura 5.8 – Corrente gerada em uma das fases da máquina síncrona.



Fonte: Dados do próprio autor.

Na Figura 5.8 nota-se que o mesmo efeito ocorrido na tensão também é verificado na corrente da máquina síncrona. Como a máquina não está operando em sua velocidade nominal (1800 rpm) isso acarreta o aparecimento de níveis harmônicos na sua corrente gerada, evidenciado pelo *zoom* no topo da figura. Quando ocorre sua aceleração, a frequência da corrente também cresce, caracterizando o funcionamento da máquina síncrona.

5.2.4. RETIFICADOR TRIFÁSICO

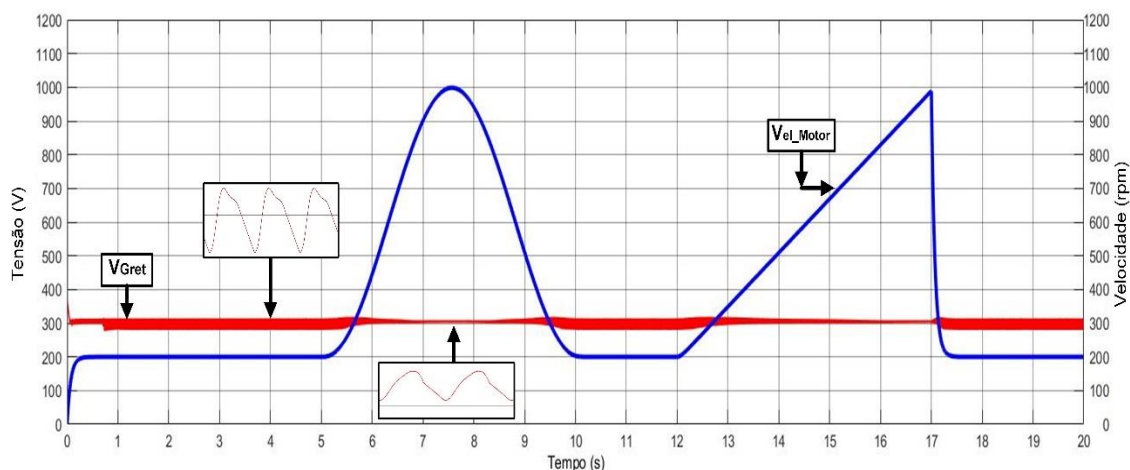
O retificador trifásico em ponte de Graetz foi conectado na saída do gerador síncrono para retificar suas tensões e correntes senoidais.

O retificador utilizado não possuiu nenhum tipo de controle, sendo que a energia gerada será processada pelo conversor *Boost*. Portanto, o retificador tem o único propósito de fornecer um nível contínuo de tensão e corrente na entrada do conversor.

Como o sistema não será conectado na rede elétrica, funcionando de maneira isolada, não se preocupou com os distúrbios gerados pelo retificador em níveis de qualidade de energia elétrica.

A Figura 5.9 demonstra a forma de onda na saída do retificador trifásico.

Figura 5.9 – Nível de tensão na saída do retificador trifásico.



Fonte: Dados do próprio autor.

Verificando a Figura 5.9, o aumento da velocidade de rotação do motor CC provoca um leve aumento na amplitude da tensão retificada (gráfico na cor vermelha),

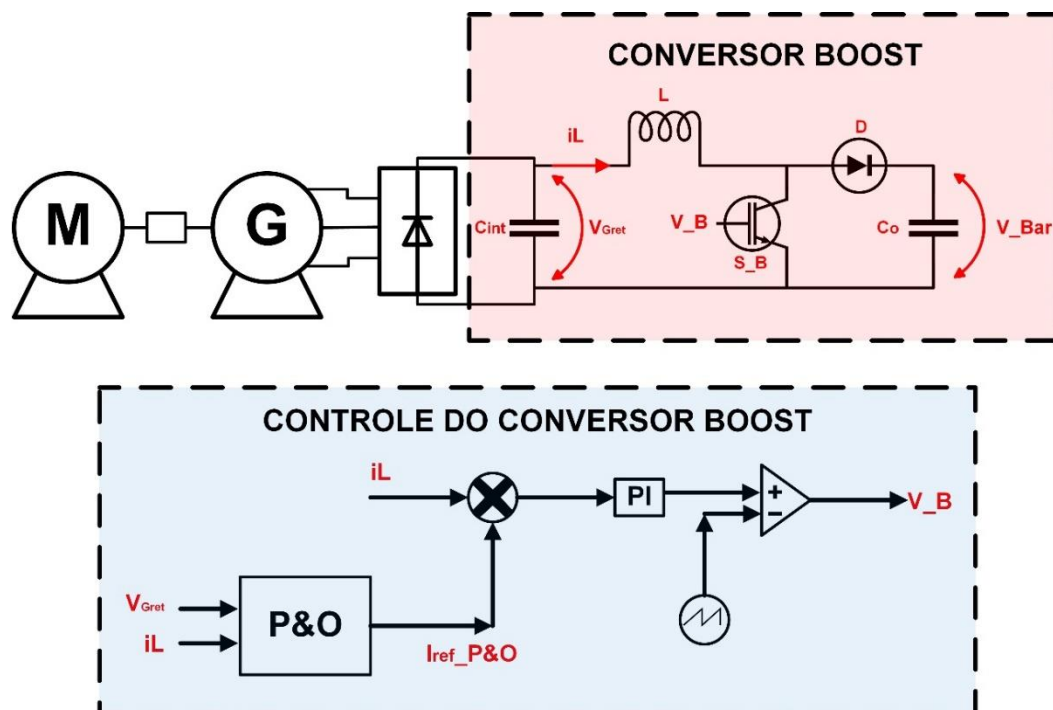
porém, a tensão ainda se mantém próximo ao valor definido como tensão base para sua geração.

5.2.5. CONVERSOR BOOST

O conversor CC-CC utilizado foi o Boost em sua topologia clássica, como foi mostrado na Figura 5.1.

O conversor é responsável por executar a extração de máxima potência do sistema através do algoritmo P&O. Levando em consideração que o nível de tensão nos terminais do retificador controlado depende da operação do grupo motor-gerador, o controle da potência extraída do sistema é realizado através do controle da corrente de entrada do *Boost*. A Figura 5.10 demonstra o conversor *Boost* e seu controle realizado.

Figura 5.10 – Conversor *Boost* e seu controle.



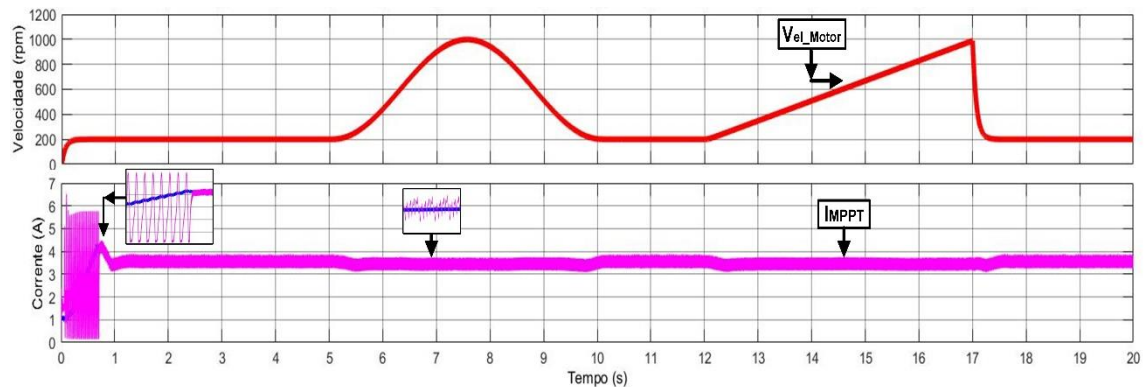
Fonte: Dados do próprio autor.

Como o sistema que está gerando energia elétrica possui características lentas, a amostragem da corrente no indutor e da tensão de entrada no conversor ocorreu na ordem de 1kHz.

O controlador de corrente e o algoritmo do MPPT que atuam no controle do conversor *Boost* foram validados a partir de um valor de corrente especificado como

referência e com base no nível de corrente que estava sendo gerado, possibilitou a extração da máxima potência do sistema. A Figura 5.11 demonstra a resposta do conversor para o controlador elaborado juntamente com o algoritmo P&O em funcionamento.

Figura 5.11 – Resposta do controle estipulado no conversor *Boost*.

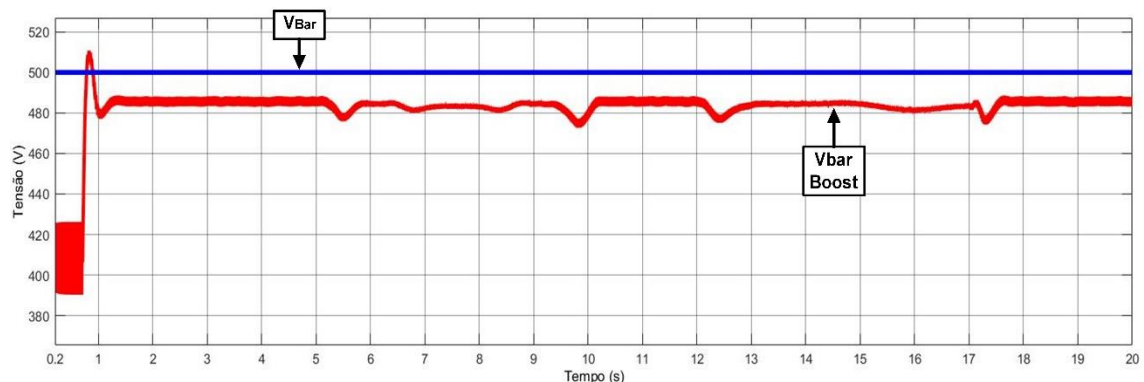


Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 5.11, percebe-se que a variação de velocidade do motor CC interfere na corrente gerada pela máquina síncrona. Porém, o controle de MPPT implementado manteve o valor gerado (gráfico, na cor rosa) próximo ao valor de referência (gráfico, na cor azul).

Como a estratégia de controle do conversor foi implementado através da imposição da sua corrente de entrada, o nível da sua tensão de saída é consequência do montante de energia processada pelo *Boost*. Desta forma, a tensão de saída do conversor *Boost* é evidenciada na Figura 5.12.

Figura 5.12 – Tensão na saída do conversor *boost*.



Fonte: Dados do próprio autor.

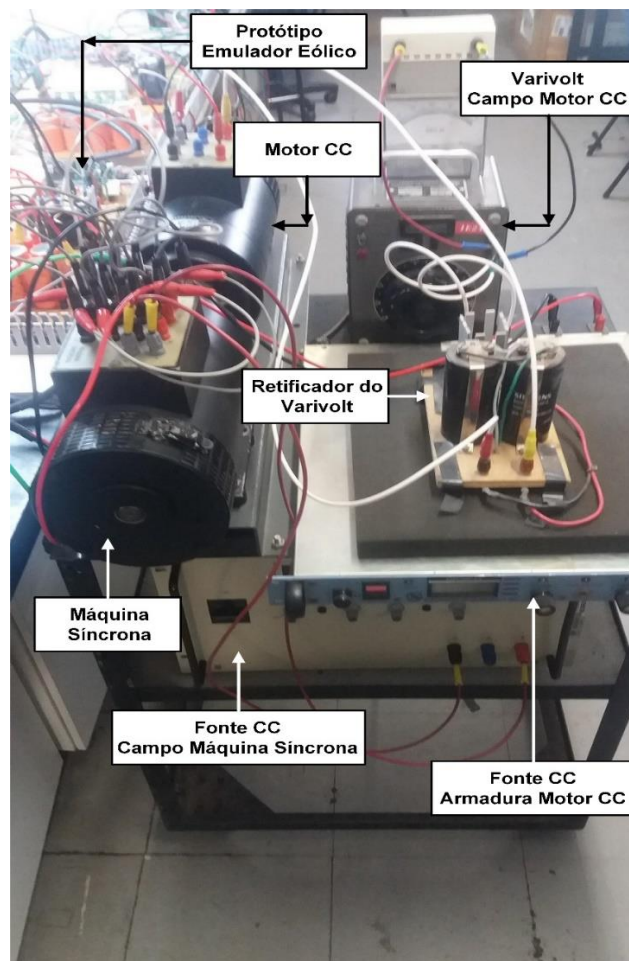
Analisando a Figura 5.12, a tensão produzida na saída do conversor, mesmo com todas as oscilações provocadas pela variação da velocidade do motor CC, se mantém em um valor médio de 484 V, 3% abaixo do valor de referência de 500 V. Assim, o controle da corrente de entrada do *Boost* se manteve dentro de valores aceitáveis, validando o método utilizado.

5.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.3.1. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO E SUAS ESPECIFICAÇÕES

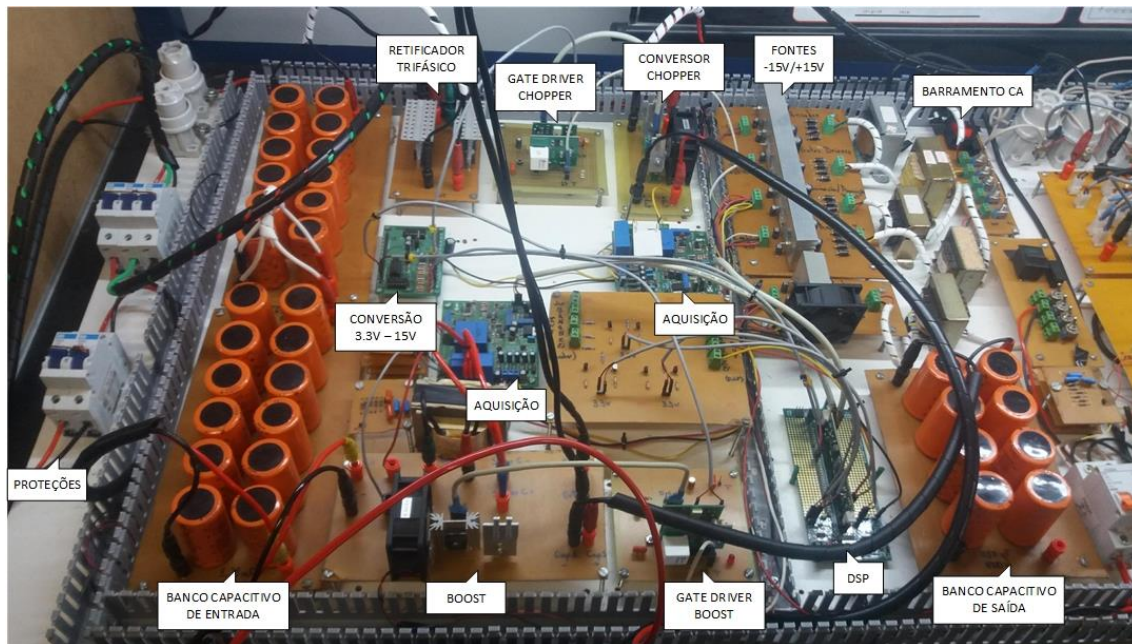
Foi desenvolvido um protótipo emulador eólico para a validação dos resultados obtidos por meio das simulações computacionais. O protótipo foi montado com capacidade máxima de 1 kW. A Figura 5.13 mostra o sistema completo montado, a Figura 5.14 evidencia o protótipo construído e a Tabela 5.1 demonstra os dados dos principais componentes utilizados.

Figura 5.13 – Sistema completo montado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.14 – Protótipo emulador eólico construído.



Fonte: Dados do próprio autor.

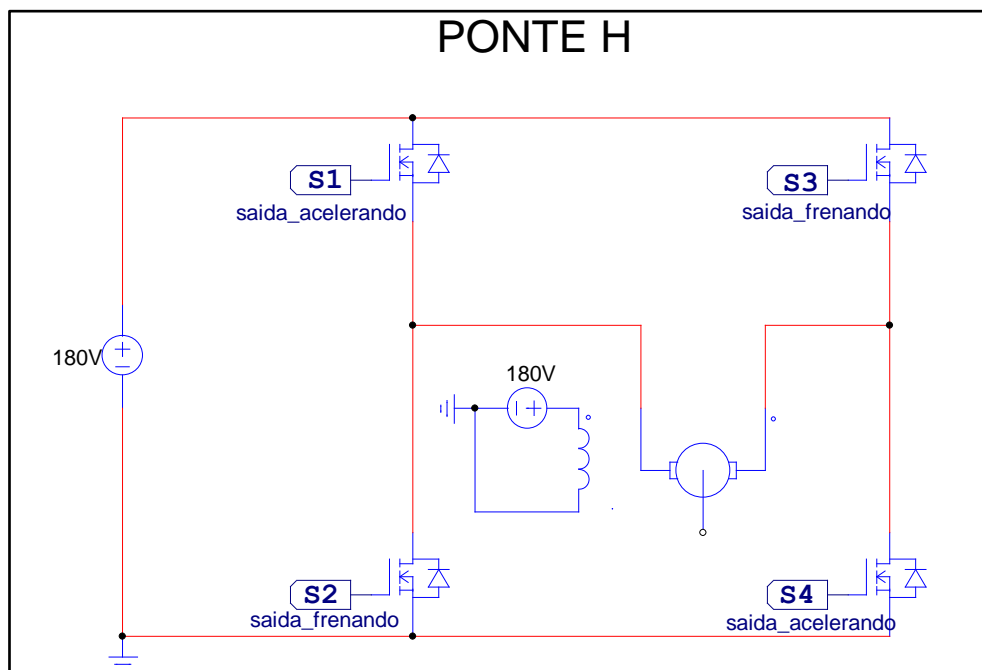
Tabela 5.1 – Parâmetros dos principais componentes utilizados no protótipo.

Componente	Especificação
Indutor L	Núcleo de Ferrite; 7mH
Capacitores C_1	Associação de capacitores eletrolíticos: 1,39mF
Capacitor C_{BAR}	Associação de capacitores eletrolíticos: 457 μ F
Interruptores S_M	IGBT – IRG4PC40KD: 600V; 25A
Interruptor S_B	IGBT – IRG4PH50UD: 1200V; 24A
Diodo D_M	APT30D60B: 600V; 30A
Diodo D_B	APT30D100B: 1000V; 30A
Microcontrolador	DSP – TMS320F28335

Fonte: Dados do próprio autor.

Inicialmente o acionamento do motor seria implementado por um circuito denominado de Ponte H, como representado na Figura 5.15.

Figura 5.15 – Circuito da Ponte H.

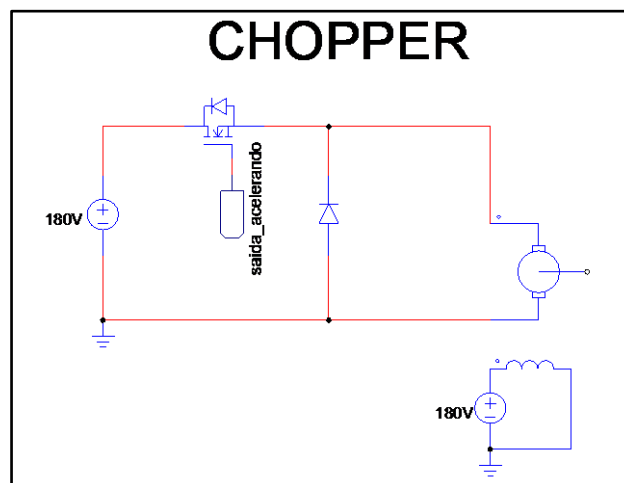


Fonte: Dados do próprio autor.

Esse circuito opera alternando a polarização e o bloqueio dos interruptores S1/S4 e S2/S3. A vantagem desse circuito é que dependendo da forma que ocorre o chaveamento dos interruptores, a energia entregue ao motor pode estar na mesma polaridade da fonte ou em sentido contrário, proporcionando assim que o motor gire no sentido horário ou anti-horário. A placa desse circuito foi montada e testada no protótipo. Porém, a operação da ponte alternando a polarização e bloqueio dos interruptores provocou oscilações mecânicas no eixo do motor, prejudicando sua operação de acordo com a estratégia de controle adotada.

Como o circuito da Ponte H não forneceu um controle satisfatório para o acionamento do motor, foi utilizado um *chopper* para tal finalidade. Esse circuito é composto por um interruptor e por um diodo, conforme ilustra a Figura 5.16.

O interruptor tem a função de controlar o fluxo de energia da fonte que será entregue a carga e o diodo tem a função de proporcionar a carga um caminho de retorno da corrente.

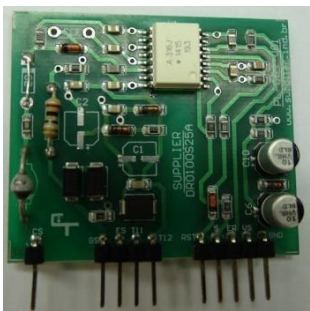
Figura 5.16 – Circuito do *chopper* utilizado.


Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando o esquemático da Figura 5.16, como o circuito utiliza apenas um interruptor, ele controla o fluxo de energia apenas em um sentido, pois a energia entregue ao motor terá sempre a mesma polaridade da fonte de alimentação, acarretando apenas um sentido de rotação para o motor CC. Como o propósito do controle do motor era apenas acelerar ou diminuir sua velocidade de rotação, o circuito do *chopper* utilizado foi prático e eficaz. A utilização de apenas um interruptor ao invés de quatro, como seria usado no circuito da Ponte H, tornou o protótipo economicamente mais viável.

O acionamento dos interruptores tanto na placa do *chopper* quanto na placa do conversor *Boost* foram implementados utilizando-se o circuito de gatilho simples (*gate driver simples*) DRO10025A da *Supplier*[®]. Essa placa possui em sua estrutura a proteção contra curto circuito através do monitoramento da tensão entre coletor e emissor. Essa placa com suas principais características é mostrada na Tabela 5.2.

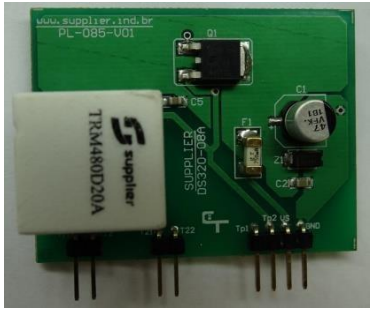
Tabela 5.2 – Placa do *gate driver simples*.

	Tensão de alimentação: 15 V
	Frequência de comutação: até 100 kHz
	Tensão de monitoramento entre coletor e emissor: 1000 V
	Tensão de gatilho ligado: 15 V
	Tensão de gatilho desligado: -8 V
	Limiar de tensão alta: 9 V
	Limiar de tensão baixa: 6,3 V

Fonte: (SUPPLIER).

A alimentação do *gate driver* foi obtida através de uma fonte de alimentação isolada pelo modelo DS320-08A da *Supplier*[®], a fonte utilizada, juntamente com suas principais características é informada na Tabela 5.3.


Tabela 5.3 – Placa da fonte de alimentação do *gate driver*.

	Tensão de alimentação: 15 V
	Tensão de isolamento entre primário e secundário: 1500 V
	Proteção contra curto-circuito: fusível 750 mA
	Proteção de sobretensão: diodo zener de 18 V
	Temperatura de operação: 85 °C
	Transformador de pulso: utilizado em conjunto com a fonte para alimentar até dois drivers

Fonte: (SUPPLIER).

O microprocessador utilizado na implementação do controle digital utilizado no protótipo foi o DSP TMS320F28335 da *Texas Instruments*[®], a Tabela 5.4 mostra o microprocessador utilizado e suas principais características.

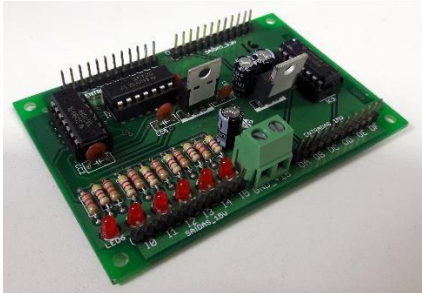
Tabela 5.4 – Placa DSP TMS320F28335 da *Texas Instruments*[®].

	Conversor analógico / digital (A/D)
	Arquitetura de ponto flutuante de 32 bits
	Frequência de <i>clock</i> de 150 MHz
	Memória flash: 512 kB
	Memória RAM: 68 kB
	176 pinos de entrada / saída de propósito geral

Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS).

A tensão de trabalho desse microprocessador ocorre na faixa de 0 a 3,3V e o acionamento de gatilho dos interruptores é feito na faixa de 0 a 15V. Desta forma, uma placa de conversão de níveis de tensão foi utilizada para se adequar esses sinais de 0 — 3,3V para 0 — 15V. Essa placa de conversão e suas particularidades são apresentadas na Tabela 5.5.

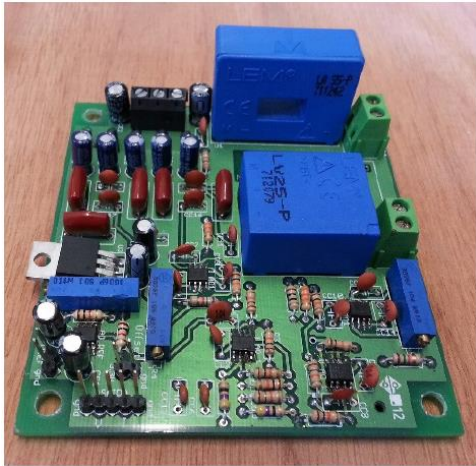
Tabela 5.5 – Especificações da placa de conversão de sinais de 3,3 V para 15 V.

	Conversão 3,3 V ↔ 15 V
	6 entradas 3,3 V / 6 entradas 15 V
	6 saídas 3,3 V / 6 saídas 15 V

Fonte: Dados do próprio autor.

A aquisição dos sinais de corrente e tensão do protótipo, seja para controle ou para proteção do sistema, foi realizada através de uma placa de aquisição de sinais que possibilitou a conexão dos mesmos às entradas A/D (analógico – digital) do microprocessador utilizado. A Tabela 5.6 apresenta a placa de aquisição utilizada juntamente com suas características.

Tabela 5.6 – Módulo para aquisição e condicionamento de sinais de tensão e corrente

	Tensão de alimentação	± 12 V
	Máxima corrente eficaz de medição	50 A
	Faixa de medição de corrente	- 70 A a + 70 A
	Máxima tensão eficaz de medição	500 V
	Faixa de medição de tensão	- 500 V a + 500 V
	Faixa de tensão do sinal de saída	0 a 3,3 V
	Nível de <i>offset</i>	1,5 V

Fonte: (Rodrigues, 2016).

No protótipo ainda foram utilizados disjuntores e fusíveis para proteção contra curto circuito e sobrecargas elétricas. Também foram utilizados *coolers* e dissipadores de calor no intuito de maximizar a troca de calor entre os diodos e interruptores com o ar, contendo a deterioração excessiva e aumentando a vida útil dos mesmos. Para a alimentação da fonte de alimentação DS320-08A da *Supplier*[®], o módulo de conversão,

a placa de aquisição e os *coolers* foram utilizados circuitos auxiliares com saídas reguladas em +15V e -15V.

5.3.2. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DAS COMPONENTES DO VENTO NO PROTÓTIPO

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais para cada componente do vento separadamente, bem como suas combinações. Esses mesmos sinais já foram obtidos em simulações computacionais, como já foi mencionado, e agora os mesmos sinais serão mostrados de acordo com a velocidade do eixo do motor.

Para que as componentes do vento pudessem ser emuladas a partir da rotação no eixo do motor CC, o controle de velocidade do mesmo deveria estar em perfeita sintonia entre a interface computacional e a máquina rotativa. Essa sintonia ocorre quando a leitura de velocidade no eixo da máquina é interpretada de maneira correta pelo sistema de controle, que por sua vez executará os comandos necessários para que a referência de velocidade seja alcançada.

Como a primeira tentativa para a leitura de velocidade do motor não foi bem-sucedida, como é mostrado no Apêndice B, optou-se por realizar a avaliação da velocidade de uma maneira indireta.

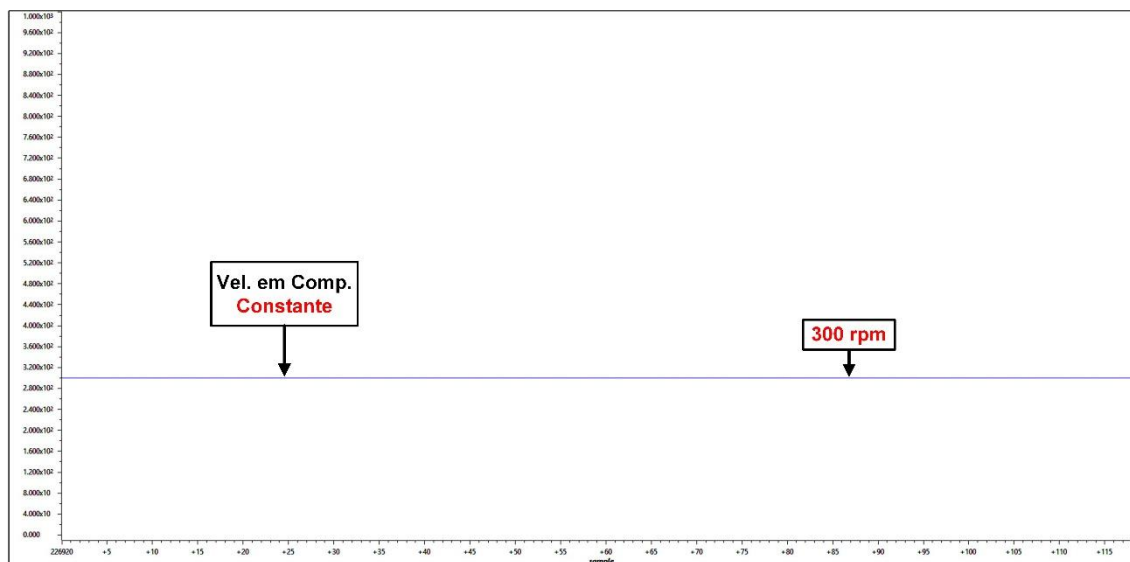
A máquina CC possui seu enrolamento de campo alimentado com tensão constante. Assim, quanto mais tensão aplicada em seu circuito de armadura maior será a velocidade de rotação em seu eixo. Explorando essa característica foi utilizado uma segunda placa de aquisição de sinais de tensão e corrente, para que a tensão na armadura pudesse ser mensurada e consequentemente controlada. Como a tensão na armadura é proporcional a velocidade de rotação da máquina, elaborou-se uma lógica de controle que pudesse relacionar tais características impondo o funcionamento desejado da mesma no protótipo. Esse controle foi elaborado a partir de testes práticos mensurando a velocidade de rotação do motor a partir de um tacômetro para vários valores de tensão aplicados na armadura do motor variando de 0V até a tensão nominal de 180V elaborando assim uma função matemática que relacionasse as duas grandezas. Esse tipo de controle é dito indireto, pois o controle de velocidade da máquina CC está sendo realizado a partir de uma grandeza não desejada diretamente. Desta forma, o controle

está sendo feito na tensão de armadura e consequentemente influenciando a velocidade de rotação da máquina sem nenhum controle aplicado na mensuração da velocidade diretamente. Logo, controlando a tensão de armadura, indiretamente controlou-se a velocidade da máquina.

Com o controle do motor funcionando da forma desejada, as componentes do vento puderam ser emuladas no mesmo. Para que cada componente do vento pudesse ser refletida no funcionamento do protótipo, cada sinal referente ao vento foi convertido em sinal de velocidade de rotação da máquina, que está diretamente relacionado a um valor de tensão aplicado à sua armadura.

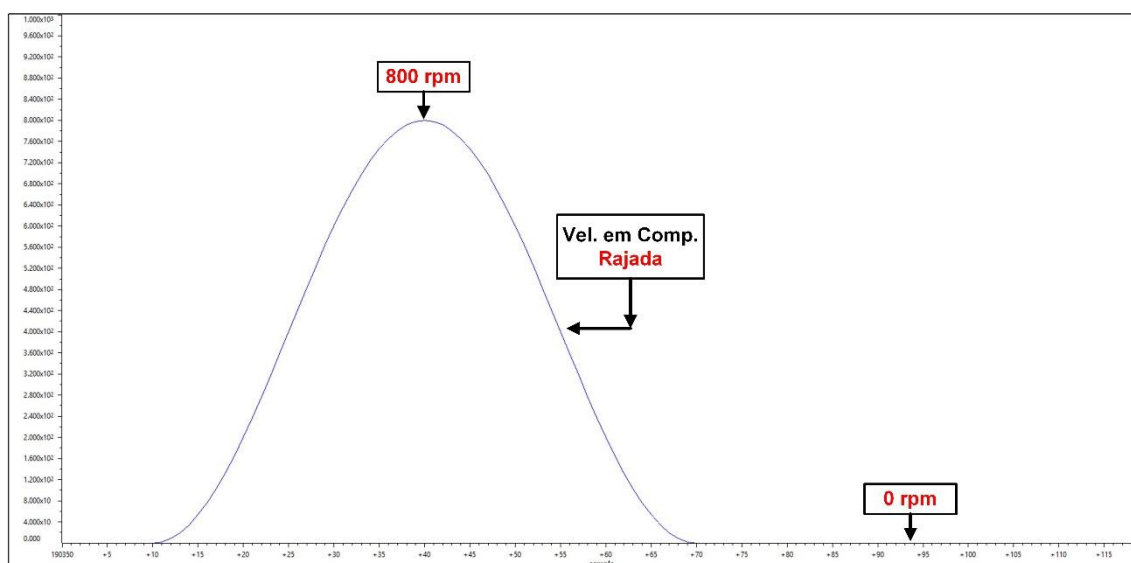
Para demonstrar o funcionamento do motor, com os sinais de vento como referência, era necessário um dispositivo que medisse a velocidade e que a exibisse em forma de gráfico. Como não se tinha posse de um dispositivo que realizasse tal função, os resultados da velocidade do motor foram apresentados com o auxílio da ferramenta *graph* do software *Code Composer*. Desta forma os resultados referentes a cada componente do vento são mostrados nas Figuras 5.17 a 5.20.

Figura 5.17 – Componente constante do vento visto pelo motor.



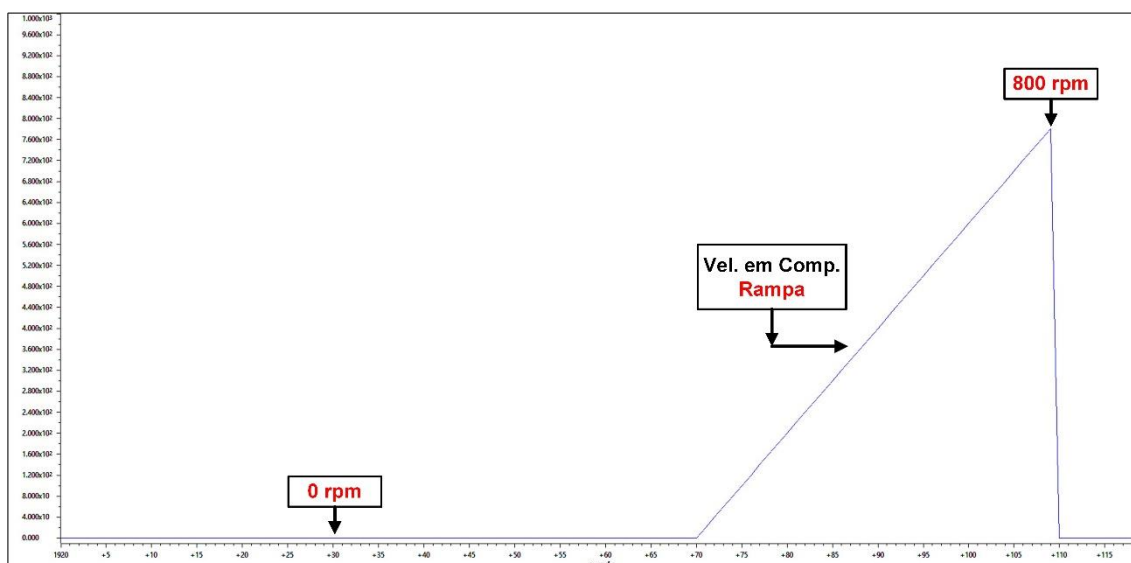
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.18 – Componente rajada do vento visto pelo motor.



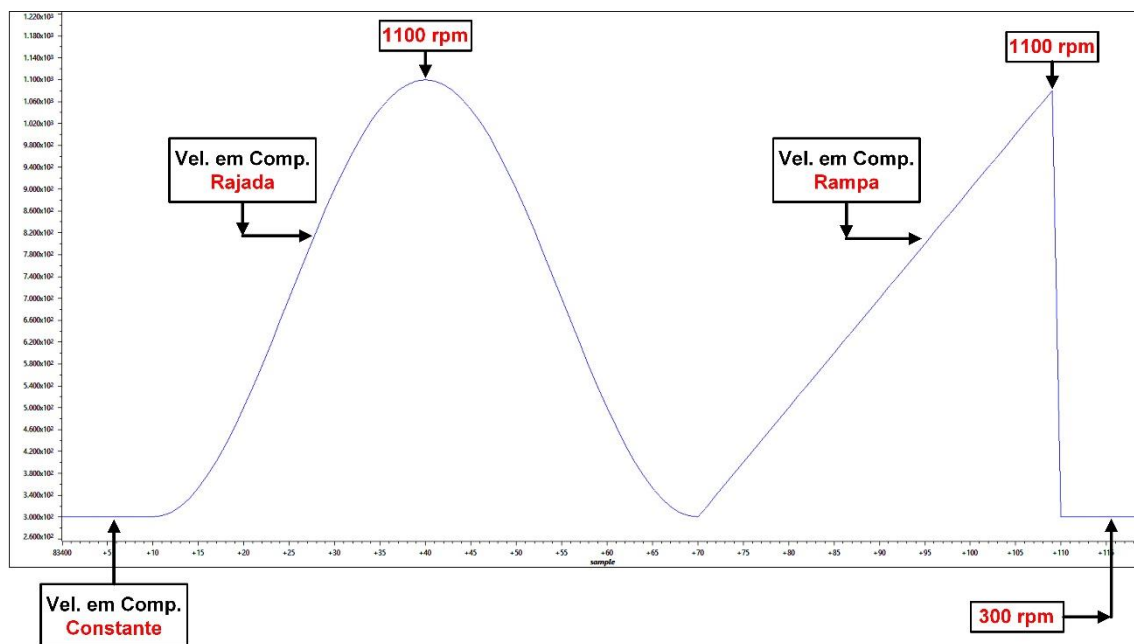
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.19 – Componente rampa do vento visto pelo motor.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.20 – Componentes constante, rajada e rampa vistos pelo motor.



Fonte: Dados do próprio autor.

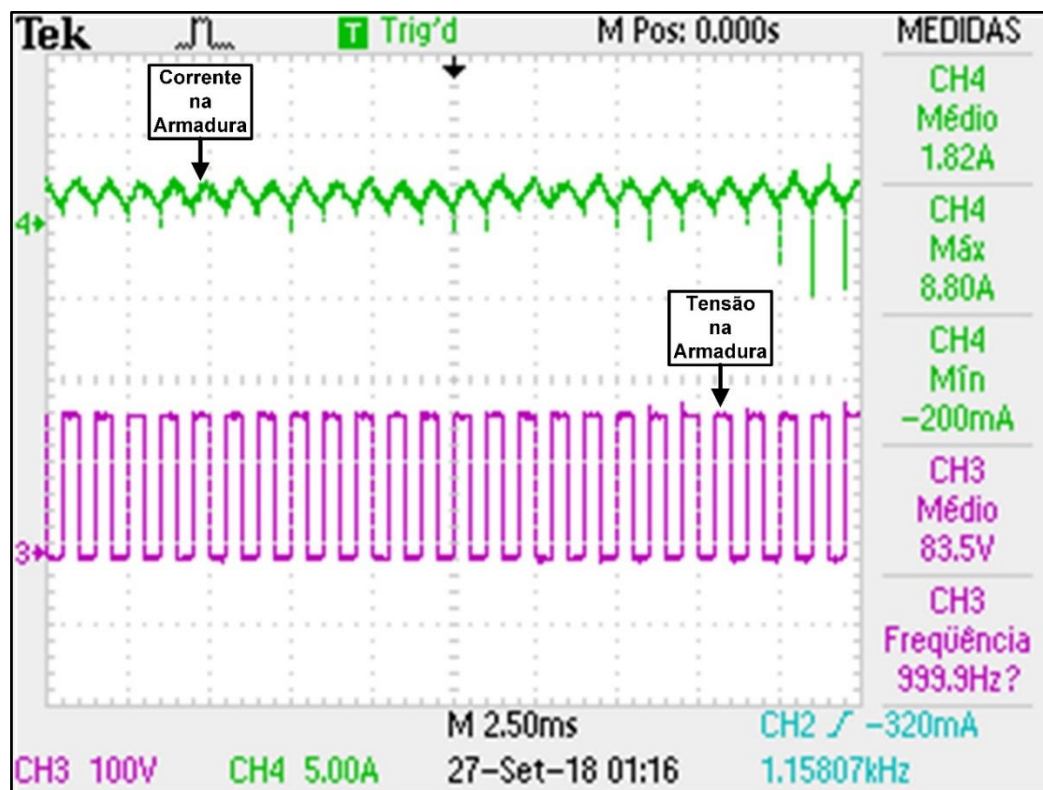
Além dessas três componentes principais, o vento ainda possui a componente de ruído, porém, essa componente não pôde ser identificada no funcionamento do motor na prática. Isso ocorreu porque os níveis de ruídos ocorrem de maneira rápida e aleatória. Como o motor possui um momento de inércia relativamente grande comparado a mudança de cada nível de ruído, as mudanças de alimentação na armadura da máquina eram muito rápidas. Com isso, enquanto o motor ainda processava e realizava o movimento de rotação referente ao primeiro nível, o comando de alimentação da máquina já estava três a quatro pontos de ruídos a frente. Analisando o comportamento do motor, percebeu-se que a alimentação da armadura do motor estava muito rápida em comparação com a resposta do seu movimento de rotação. Assim, diminuiu-se essa velocidade de alimentação. Desta forma, o nível de ruído foi notado pelo motor, mas isso acarretou muita vibração em sua estrutura. Esses níveis mais altos de tensão poderiam acarretar danos mais sérios no motor. Como o intuito do trabalho não era proporcionar o controle fiel de todas as componentes do vento emuladas no motor CC, a componente ruído foi descartada para análises de processamento de energia no sistema.

5.3.3. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL NA MÁQUINA CC

O motor CC e o gerador trifásico foram alimentados a partir de 3 fontes, onde, duas delas sendo fontes CC com variação de 0 a 300V e a outra um varivolt monofásico ligado em série com um retificador monofásico.

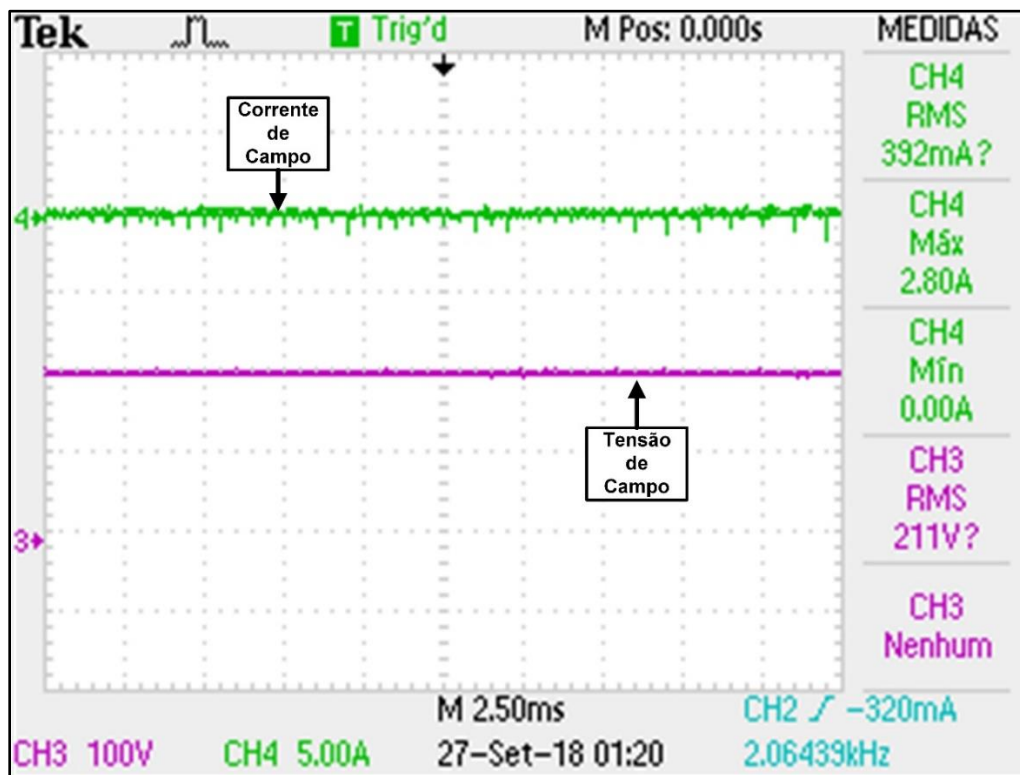
Uma das fontes CC foi destinada a alimentação da armadura do motor, que por sua vez, foi controlada a partir do circuito do *chopper* escolhido. A fonte foi parametrizada em uma tensão de 180V e toda a energia entregue a armadura do motor foi controlada pelo *chopper*. A outra fonte foi destinada a alimentação do circuito de campo do motor e também foi fixada numa tensão de 180V. As tensões vistas na armadura e no campo do motor CC são apresentadas nas Figuras 5.21 e 5.22.

Figura 5.21 – Tensão vista na armadura do motor CC.



Fonte: Dados do próprio autor.

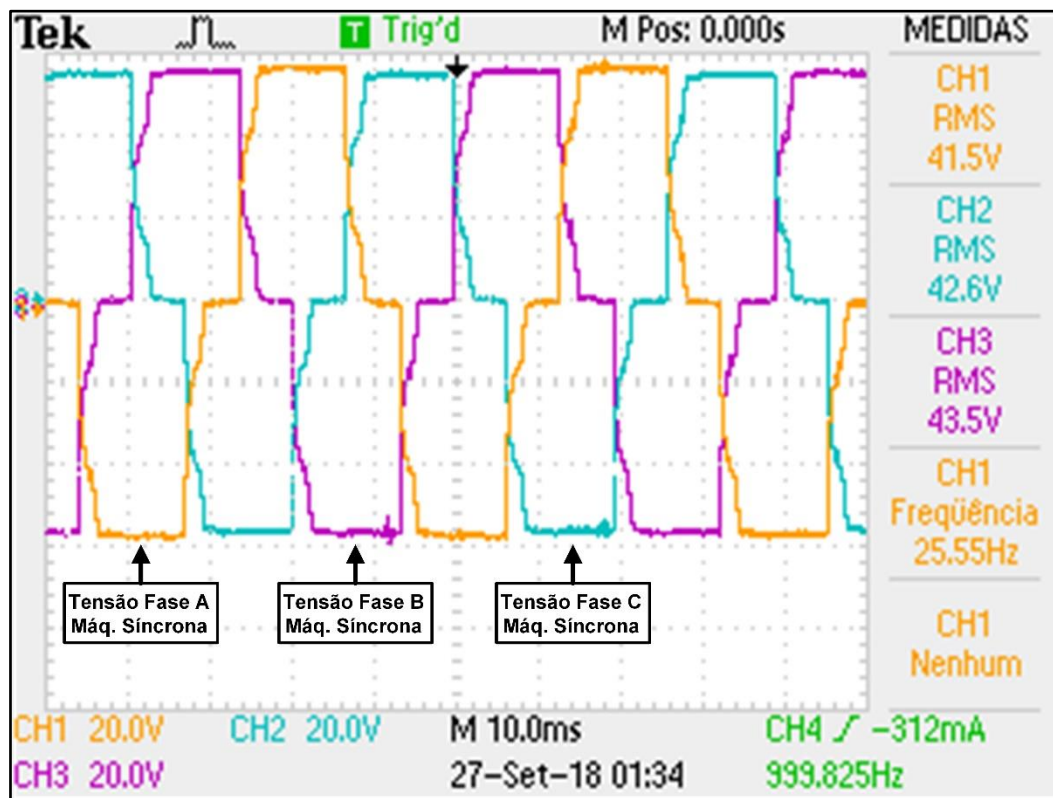
Figura 5.22– Tensão no circuito de campo do motor CC.



Fonte: Dados do próprio autor.

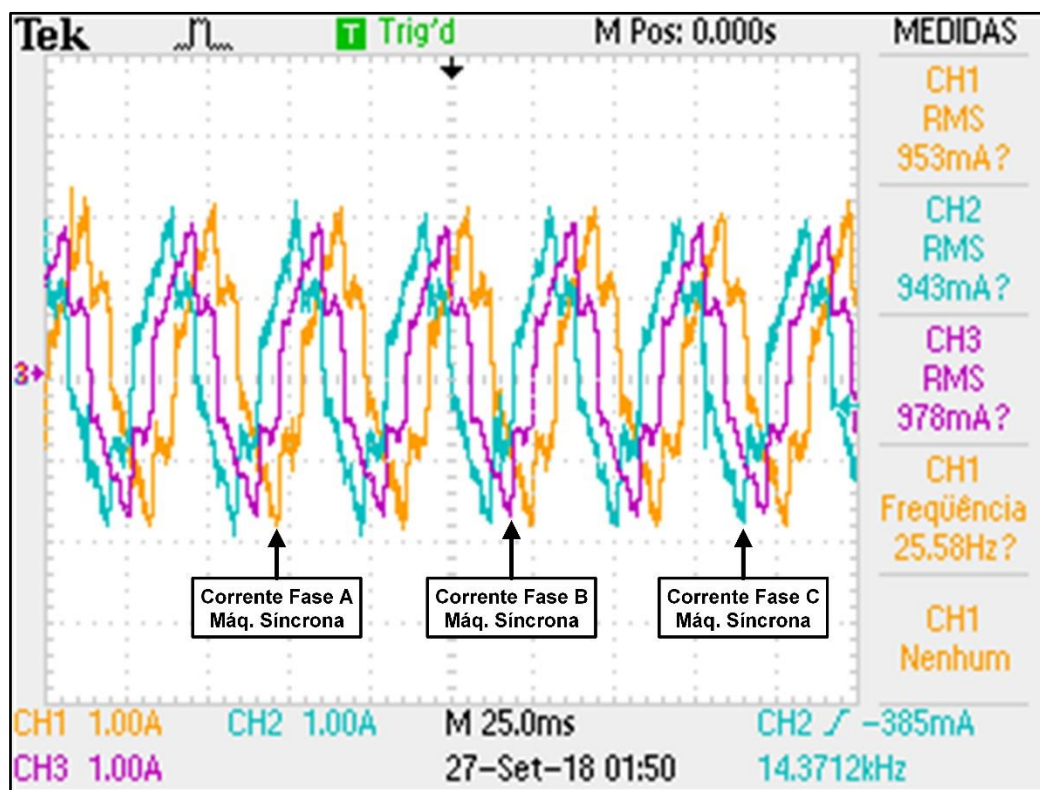
Como o gerador síncrono necessitava de uma alimentação constante em seu circuito de campo, foi escolhido um varivolt monofásico ligado em série com um retificador, também monofásico, e fixando em uma tensão de 12 V. Essa alimentação do gerador trifásico também se manteve constante durante todo o processo de extração de resultados. As tensões e correntes trifásicas geradas são mostradas nas Figuras 5.23 e 5.24.

Figura 5.23 – Tensões trifásicas na saída da máquina síncrona.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.24 – Correntes trifásicas na saída da máquina síncrona.



Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando as Figuras 5.23 e 5.24 percebe-se que as tensões e correntes geradas pelo gerador trifásico possuem a presença de harmônicos. Esses harmônicos aparecem principalmente pelo fato do motor CC não estar funcionando em sua velocidade nominal e pela dimensão da máquina síncrona utilizada. O motor não foi controlado em sua velocidade nominal por motivos de segurança de construção do protótipo, provocando a geração de tensões com amplitudes menores. Por se tratar de um gerador de pequeno porte e não tão robusto, proporcionou o aparecimento de vibrações mecânicas que afetaram o funcionamento do mesmo.

As distorções nas formas de onda das tensões e correntes geradas, especificadas nas Figuras 5.23 e 5.24, são consequência da imposição de um valor específico da tensão de linha, na máquina síncrona, pelo conversor *Boost*. Essa determinação em um valor específico de tensão ou corrente pelo conversor, bloqueia a geração dessas grandezas na máquina síncrona ocasionando suas deformações (TIBOLA, 2009).

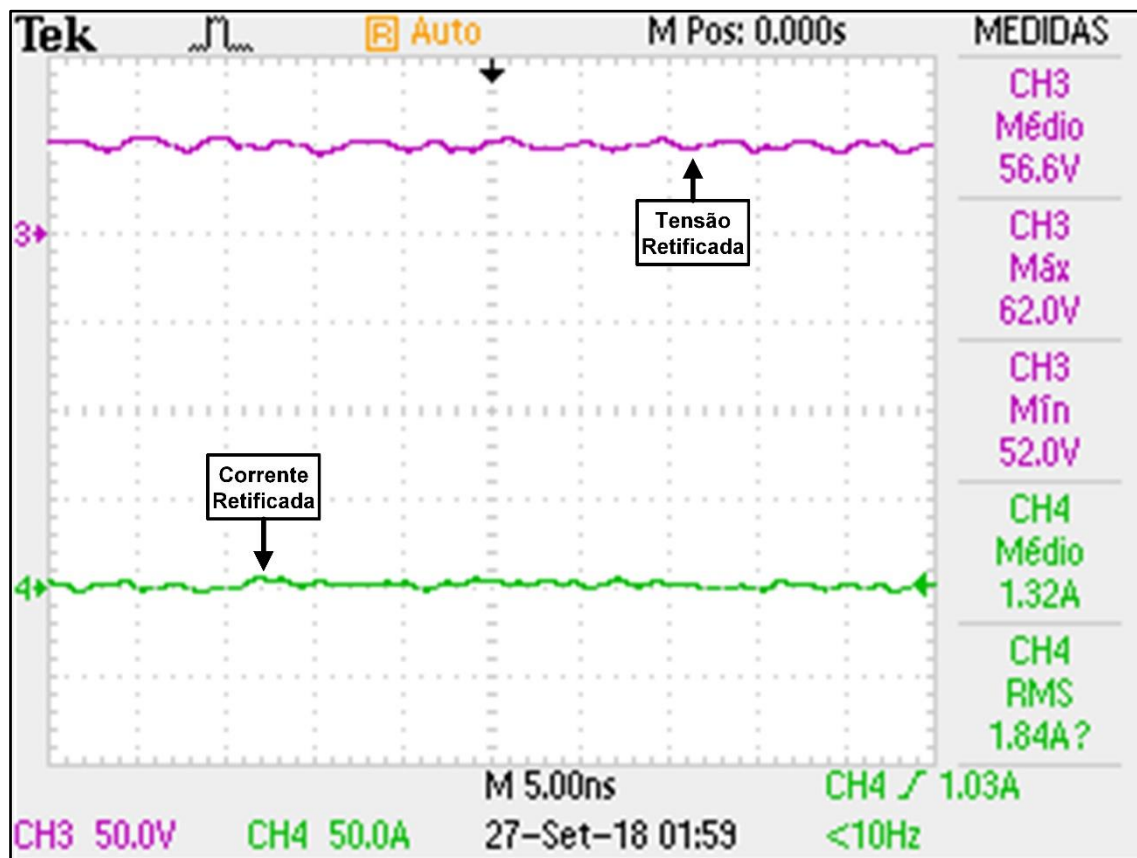
O conteúdo harmônico existente nessa etapa de operação não foi preocupante pelo fato de que nos próximos estágios de funcionamento do protótipo ocorre a retificação das tensões e correntes geradas e ainda possuir um conversor *Boost* cascadeado, este responsável pelo controle da potência extraída do sistema. Mesmo as componentes geradas possuindo conteúdos harmônicos consideráveis, isso não afetou o funcionamento do protótipo.

Do ponto de vista da eletrônica de potência o aumento do conteúdo harmônico não interferiria pelo fato de haver outros estágios para o processamento da energia, porém, do ponto de vista da máquina síncrona, o aumento do conteúdo harmônico de corrente pode acarretar maiores valores eficazes de corrente, atribuindo assim, aquecimento na máquina e interferindo em seu funcionamento.

5.3.4. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO RETIFICADOR TRIFÁSICO

O retificador trifásico utilizado forneceu como resultados a tensão e corrente mostradas na Figura 5.25.

Figura 5.25 – Ondas de tensão e corrente na saída do retificador trifásico.



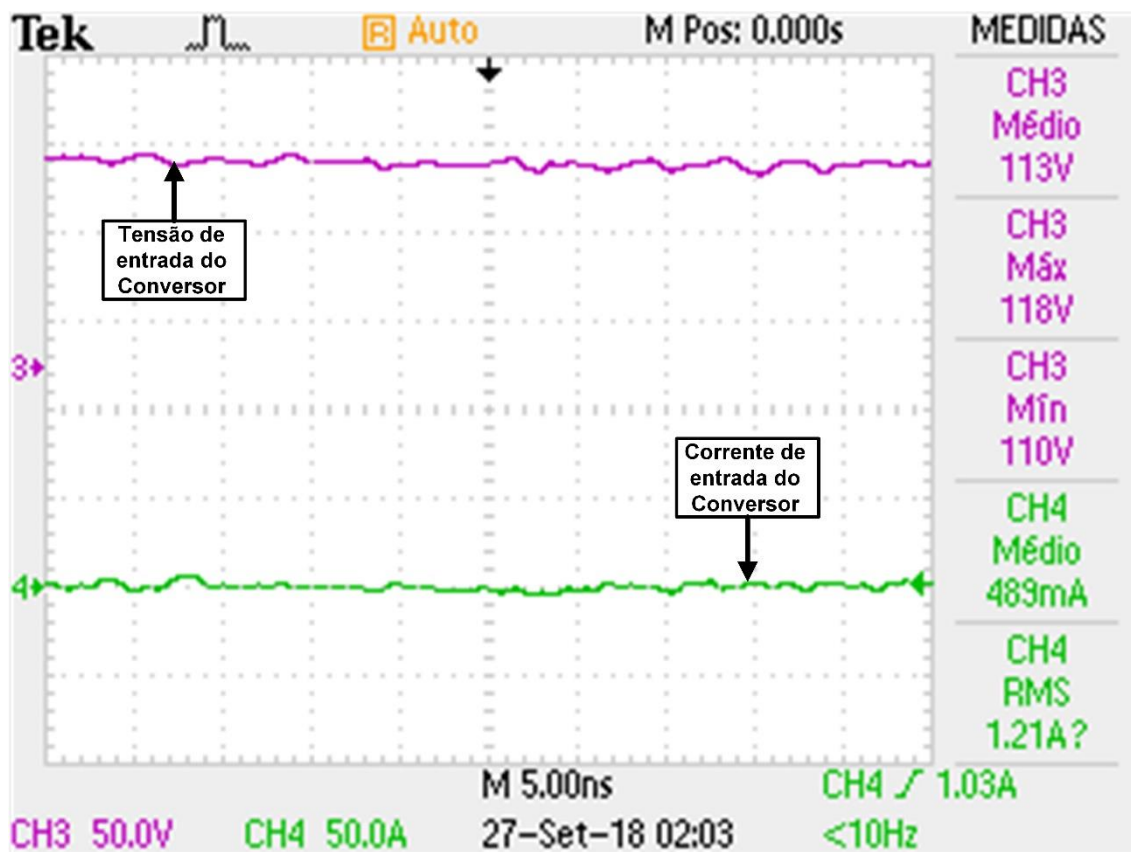
Fonte: Dados do próprio autor.

Os níveis de tensão e corrente fornecidos na saída do retificador trifásico estão dentro dos níveis desejados para a comprovação do funcionamento do protótipo. Como o retificador utilizado não possui nenhum tipo de controle, toda componente de tensão e corrente inserida em sua entrada é retificada de maneira direta seguindo o funcionamento dos diodos utilizados.

5.3.5. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONVERSOR BOOST

A tensão e corrente na entrada do conversor boost utilizado estão demonstrados na Figura 5.26.

Figura 5.26 – Tensão e corrente na entrada do conversor *boost*.



Fonte: Dados do próprio autor.

Verificando a Figura 5.26, os níveis de tensão e corrente se encontram estáveis para o funcionamento do protótipo. Mesmo com um conteúdo harmônico considerável o sistema conseguiu fornecer níveis de tensão e corrente com poucas variações, validando assim, o funcionamento do motor e consequentemente do protótipo.

A utilização de um indutor e do banco capacitivo relativamente grandes na entrada do protótipo do conversor filtrou grande parte das distorções de correntes e tensão existentes na saída do gerador trifásico. Mesmo tornando o boost um pouco mais lento para as respostas do controle, os pequenos atrasos não interferiram no funcionamento do protótipo.

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados de cada etapa de operação do protótipo. Foram analisadas a geração de energia, sua retificação e a extração de máxima potência do protótipo. A geração foi realizada pelo conjunto de

máquinas CC e gerador trifásico, a retificação pelo retificador trifásico e a extração da potência pelo conversor boost.

Na etapa de geração de energia mostrou-se os principais tipos de ventos que foram os sinais de entrada do motor CC, responsável por emular de maneira correta o comportamento de uma turbina eólica. Foram apresentados o comportamento do motor para cada tipo de vento e os sinais de tensão e corrente trifásicos na saída do gerador trifásico.

Na fase retificadora os sinais de tensões e correntes trifásicas foram convertidos em sinais contínuos. Estabeleceu-se um valor que não danificasse o protótipo para comprovar seu funcionamento.

No estágio de extração de máxima potência os resultados de simulação comprovaram o funcionamento do algoritmo utilizado. Já os resultados experimentais dessa etapa mostraram o funcionamento do sistema sem as variações de velocidade provocadas pelas componentes do vento. O conversor teve bom desempenho para as variações de tensão e corrente gerados na estratégia de emular o comportamento dos aerogeradores.

6. CONCLUSÕES GERAIS

No objetivo de sintetizar a pesquisa desenvolvida, os resultados experimentais e práticos obtidos e as contribuições que o trabalho veio apresentar, mostra-se uma avaliação conclusiva nesse capítulo.

Desta forma, apresentou-se uma estrutura que emulou o comportamento de um aerogerador de pequeno porte, a partir do controle de velocidade de um motor CC. O protótipo foi composto por um motor CC e uma máquina síncrona trifásica utilizada como gerador, que foram responsáveis pela geração de energia do sistema.

As máquinas do sistema foram interligadas ao retificador trifásico e ao conversor *boost*. Esses componentes foram responsáveis por estabelecer um nível contínuo de energia e por extrair a máxima potência existente no sistema, respectivamente.

O manuseio dos componentes existentes na estrutura montada de uma forma individual é facilmente encontrado nas pesquisas sobre energia eólica, porém, a aplicação deles em um mesmo protótipo os torna simples e práticos no estudo dos aerogeradores de pequeno porte. A utilização do motor com alimentação de campo fixo e independente, a máquina síncrona empregada como gerador, também com alimentação de campo fixo e independente, e o uso do conversor *boost*, no processamento de energia, controlando sua corrente de entrada juntamente com um algoritmo MPPT de P&O foram características unidas em uma estrutura que forneceram bons resultados para a interpretação do processamento da energia provida da força dos ventos.

Para comprovação das análises realizadas na parte teórica da pesquisa construiu-se um protótipo com potência nominal de 1kW objetivando ensaios laboratoriais. Após os resultados alcançados, notou-se que a geração de energia a partir de máquinas de pequeno porte sofre muita interferência de ruídos e vibrações ocasionadas no seu funcionamento. Essas interferências são notadas nas ondas de tensão e corrente fornecidas pelo gerador trifásico a partir do aparecimento de conteúdo harmônico de pequenas ordens. Outro fato interessante, percebido nos resultados, foi que o processamento de energia feito pelo conversor CC – CC não sofreu interferências pelas distorções ocorridas nas etapas anteriores de funcionamento. Percebe-se que a utilização de um banco capacitivo juntamente com um indutor relativamente grande na entrada do conversor, filtrou grande parte das distorções que pudessem interferir no funcionamento do sistema, mesmo isso tornando as respostas do conversor mais lentas para as alterações do controle

aplicadas. Vale ressaltar que a ordem dos componentes não prejudicou o funcionamento desejado do protótipo.

Desta forma, diante os resultados apresentados, o protótipo construído pode representar de forma satisfatória os principais distúrbios ocorridos no processo de geração da energia eólica. A representação desses distúrbios em pequena escala pode facilitar a compreensão e desenvolvimento de novas técnicas para o aprimoramento da geração desse tipo de energia. Mesmo as limitações impostas por componentes que não apresentam comportamento desejado, por motivos de construção ou por agentes externos, a representação em escala laboratorial é uma das melhores formas de se aprimorar técnicas de controle ou de construção de aerogeradores.

Como sugestão, para trabalhos futuros, destaca-se a investigação da utilização de algum sensor de velocidade para o motor CC, permitindo um ajuste fino no controle de velocidade do motor, deixando o sistema mais perceptível a pequenas variações ocasionadas por mudanças na intensidade ou direção dos ventos. Outra sugestão seria testar conjuntos de máquinas diferentes, tanto motor quanto gerador, no intuito de conseguir resultados mais precisos com menos distorções harmônicas, melhorando a qualidade da energia produzida. A implementação de um sistema na configuração DFIG tornaria possível a construção de um protótipo com potência mais elevada com recursos financeiros mais baixos. A utilização de um retificador semi ou totalmente controlado, no intuito de melhorar o processamento da energia para níveis com maior rendimento e menores distorções, também é uma sugestão de aprimoramento do atual trabalho.

Desta forma, destaca-se a continuação e aprofundamento dos estudos relacionados aos elementos que foram responsáveis pela construção do emulador eólico, dos conversores de potência que atuam no processamento de energias renováveis e por fim, a rede elétrica, no intuito de aperfeiçoar a matriz energética do país para um sistema mais renovável.

REFERÊNCIAS

ABEEólica. (1 de Fevereiro de 2019). abeeolica.org.br. Fonte: ABEEólica: <http://abeeolica.org.br/>

ALVARENGA, E. B. (2012). Uma proposta laboratorial para estudos de desempenho de unidades eólicas no contexto da qualidade de energia. *Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Uberlândia*. Uberlândia, MG, Brasil.

ANDERSON, P. M., & BOSE, A. (Dezembro de 1983). Stability simulation of wind turbine systems. *Publicação de revista*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.317873>.

BARROS, C. M. (2011). Avaliação de um regulador linear quadrático aplicado em dfigs. *Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA*. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.

BARROS, L. S. (2006). Uma Estratégia de Controle para o Melhoramento do Comportamento Dinâmico de Máquinas de Indução Duplamente Alimentadas Operando como Geradores. *Tese de Doutorado*. Campina Grande, Paraíba, Brasil.

CASADOSVENTOS. (Novembro de 2017). *Casa dos Ventos*. Fonte: Site da Casa dos Ventos: <http://casadosventos.com.br>

CATIAO, N. D. (2011). Dynamic modelling and control of fully rated converter wind turbines. *Renewable Energy*, 2287-2297. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.12.025>.

DORF, R. C., & BISHOP, R. H. (2001). *Sistemas de Controle Modernos*. Rio de Janeiro: LTC.

ERICKSON, R. W., & MAKSIMOVIC, D. (2004). *Fundamentals of Power Eletronics*. New York, EUA: Kluwer Academic Puclishers.

FRANCISCO, C. M. (18 de Dezembro de 2012). Green Energy - Produção de Energia Elétrica a partir de Fontes de Energia Renovável para Sistemas de Microprodução. Funchal, Ilha da Madeira, Portugal.

HAU, & E. (2006). *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer.

- JÚNIOR, C. J. (2017). Uma Contribuição ao Estudo e Desenvolvimento de Inversores com Solares com duas Entradas de MPPT Independentes e Capacidade de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Condição de Sombreamento Parcial. *Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal de Uberlândia - UFU*. Uberlândia, MG, Brasil.
- LAVILL. (Dezembro de 2017). *LAVILL*. Fonte: Site da Lavill : <http://www.lavill.com.br>
- MAIRINCK, I. B. (Julho de 2014). Investigação, simulação e Diagnóstico sobre o controle de acionamento de uma bobinadeira de aço inoxidável. *Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG*. Belo Horizonte, MG, Brasil.
- OGATA, K. (2011). *Engenharia de Controle Moderno*. 5^a. ed. Pearson Education - Br.
- PATENÉ, E. J. (2008). Implementação de controle de velocidade em malha fechada para motores de corrente contínua utilizando sistema de aquisição de dados. *Dissertação de mestrado do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia*. São Caetano do Sul, SP, Brasil.
- REIS, J. M. (Outubro de 2013). Comportamento dos Geradores Eólicos Síncronos com Conversores Diante de Curto-Circuitos no Sistema. *Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- REN21. (Novembro de 2017). *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*. Fonte: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century: <http://www.ren21.net>
- RIBEIRO, R. V. (2011). Sistema Fotovoltaico Autônomo Baseado em Conversores CC-CC Boost. *Disertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Rodrigues, D. B. (2016). *Retificador Híbrido Trifásico com Fator de Potência unitário, alta densidade de potência e ampla faixa de regulação de tensão no barramento em corrente contínua para Conexão em Microrredes CC*. Uberlândia: Tese de Doutorado, edUFU.
- SHAFIEI, F. (2012). Modelling and verification of doubly fed induction generator (DEFIG) using real time digital simulator (RTDS). *Tese de Doutorado*. Göteborg, Sweden.

SHRIKANT S MALI, B. E. (2013). MPPT Algorithms: Extracting Maximum Power from Wind Turbines. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING*.

SILVA, F. B. (Março de 2015). Atenuação do afundamento de tensão em geradores síncronos isolados quando submetidos a partida direta de motores de indução. *Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Uberlândia - UFU*. Uberlândia, MG, Brasil.

TAVEIROS, F. E. (Maio de 2014). Sistema de Conversão de Energia Eólica Baseado no Gerador de Indução Duplamente Alimentado: Análise e Contribuição ao Controle da Máquina. *Dissertação de Mestrado*. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

TIBOLA, G. (Março de 2009). Sistema Eólico de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência. *Dissertação de Mestrado Submetida a Universidade Federal de Santa Catarina*. Florianópolis, SC, Brasil.

VILELA, A. O. (2011). Projeto e Construção de um Conversor Boost Controlado em Modo de Tensão. *Monografia apresentada para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Viçosa - UFV*. Viçosa, MG, Brasil.

WU, B. Y. (2011). Power conversion and control of wind energy systems. *IEEE Press series on power engineering*. <https://doi.org/10.1002/9781118029008>.

PUBLICAÇÃO DOS AUTORES ASSOCIADOS À PESQUISA

Dentro do período contemplado pela presente pesquisa foi realizado uma publicação em um evento de reconhecida relevância:

ARTIGO PUBLICADO EM CONFERÊNCIA REGIONAL:

- **COSTA, D.L.M.; SOARES, M.B.; LIMA, G.B.; FREITAS, L.C.G.** *Validação do Controle de um Motor de Corrente Contínua para Simulação de uma Turbina Eólica em Escala Laboratorial.* In: Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, XIII CEEL, 2016. Uberlândia – MG.

APÊNCIDE A – CÓDIGO EMBARCADO NO DSP320F28335 PARA CONTROLE DO PROTÓTIPO

```

/*****
****
// This code is created by SimCoder Version 9.1 for TI F28335 Hardware Target
//
// SimCoder is copyright by Powersim Inc., 2009-2011
//
// Date: August 31, 2018 12:57:19
*****/
#include <math.h>
#include "PS_bios.h"
typedef float DefaultType;
#define GetCurTime() PS_GetSysTimer()

interrupt void Task();
interrupt void Task_1();
interrupt void Task_2();

DefaultType fGblControl_Digital = 0.0;
DefaultType fGblCh_Chopper = 0.0;
DefaultType fGblCh_Boost = 0.0;
DefaultType fGblControl_Digital_1 = 0.0;

//*****Condições para testes*****

int inicia_chaves = 0;
int reseta_chaves = 0;
int inicia_leitura_armadura = 0;
int inicia_motor = 0;
int sentido_motor = 0;
int inicia_vento = 0;
int inicia_boost = 0;
int cat_vento = 0;
float controle_ch_M = 0;
float controle_ch_B = 0;

//*****Variáveis do controle de Velocidade do Motor CC*****

//k = 0.0001    T = 0.00001    k = k    B1 e A1 = T    B0 = 1    A0 = 0

float Vel_ref = 0;
float b0p = 0.0001;
float b1p = -0.0000999;
float a1p = -1;
float erro_Vel = 0;
float erro_Vel_ant= 0;
float Kvel = 0;
float Kvel_ant = 0;
float teste_motor = 0;

//*****Variáveis do controle de Velocidade do Motor CC*****

float Varm_ant2 = 0;
float Varm_ant1 = 0;
float filter_vel_ant2 = 0;
float filter_vel_ant1 = 0;
float filter_vel = 0;
```



```
float b0 = 3.9132644E-005;
float b1 = 7.8265288E-005;
float b2 = 3.9132644E-005;
float a1 = -1.9824046;
float a2 = 0.98256117;
float Varm = 0;
float Varm_s = 0;
float Varm_f = 0;
float iarm = 0;
float Vel = 0;
float Vel_c = 0;

//*****Variáveis do controle do Vento*****

//*****Variáveis do controle gerais*****

float pi = 3.141592654;
float contador = 0;
float segundos = 0;

//*****Variáveis do controle das Componentes do Vento*****

float Vel_Vento[120] = { 0 };
float Vel_Vento1[120] = { 0 };
float Vel_Vento2[120] = { 0 };
float Vel_Vento3[120] = { 0 };
float Vel_Vento4[120] = { 0 };
float Vel_Vento5[120] = { 0 };
float Vel_Vento6[120] = { 0 };
float Vel_Vento7[120] = { 0 };
float Vel_Vento8[120] = { 0 };
float Vel_Vento9[120] = { 0 };
int i_v = 0; // 1s em 25k é igual a 417 interações //Contador do vetor das
variáveis do vento
int if_v = 120; //referente a 2 segundos
float Var_Vento = 0;
float reseta_cont = 0;

//*****Variáveis do controle da Constatnte do Vento*****

float V_cte[120] = { 0 }; // Aceleração média da máquina, constante

//*****Variáveis do controle da Rajada do Vento*****

float Ti_rj = 10;
float T_rj = 60;
float V_rj[120] = { 0 }; // 1s em 25k é igual a 417 interações
float R_rj_max = 800; // Aceleração máxima da máquina na rajada
float mult_rj = 0;
float mult_rj_ant = 0;
float prod1_rj = 0;
float prod1_rj_ant = 0;
float prod2_rj = 0;
float prod2_rj_ant = 0;
float div1_rj = 0;
float div1_rj_ant = 0;
float div2_rj = 0;
float div2_rj_ant = 0;
float erro_rj = 0;
```

```
float erro_rj_ant = 0;

//*****Variáveis do controle da Rampa do Vento*****

float Ti_rp = 70;
float Tf_rp = 110;
float V_rp[120] = { 0 }; // 1s em 25k é igual a 417 interações
float R_rp_max = 800; // Aceleração máxima d máquina na componente rampa
float mult_rp = 0;
float mult_rp_ant = 0;
float prod_rp = 0;
float prod_rp_ant = 0;
float div_rp = 0;
float div_rp_ant = 0;
float erro1_rp = 0;
float erro1_rp_ant = 0;
float erro2_rp = 0;
float erro2_rp_ant = 0;

//*****Variáveis do controle do Ruídos do Vento*****

float dW = 2;
float Kn = 0.004;
float F = 2000;
float N = 50;
int i = 1;
float Vruido = 0;
float omegai = 0;
float mi = 0.6949;
float expoente = 1.3333;
float numerador1 = 0;
float denominador1 = 0;
float denominador2 = 0;
float Sv = 0;
float V_rd[120] = { 0 }; // 1s em 25k é igual a 417 interações
int fase_fi = 0;
int fi = 0;
int k_ruído = 1000;

//*****Variáveis do controle de MPPT por P&O*****

float iL_ant = 0;
float Delta_iL = 0;
float P = 0;
float P_ant = 0;
float Delta_P = 0;
float iL_ref_MPPT = 0.3;
float incremento = 0.1;

//*****Variáveis do controle do Conversor Boost*****

float Vret_ant2 = 0;
float Vret_ant1 = 0;
float filter_vret_ant2 = 0;
float filter_vret_ant1 = 0;
float filter_vret = 0;
float Vret_f = 0;
float iL_ant2 = 0;
float iL_ant1 = 0;
```

```
float filter_il_ant2 = 0;
float filter_il_ant1 = 0;
float filter_il = 0;
float il_f = 0;
float Vret_sc;
float il_sc;
float Vret;
float il;
float il_ref = 0;
float bo_il = 0.02006;
float b1_il = -0.01994;
float a1_il = -1;
float erro_il = 0;
float erro_il_ant = 0;
float KiL = 0;
float KiL_ant = 0;
float cont_boost = 0;
interrupt void Task()
{
    DefaultType fTI_ADC1, fZOH1, fTI_ADC1_1, fZOH2, fTI_ADC1_2, fZOH3;
    PS_EnableIntr();

    fTI_ADC1 = PS_GetDcAdc(0);
    fTI_ADC1_1 = PS_GetDcAdc(1);
    fTI_ADC1_2 = PS_GetDcAdc(2);
    fZOH1 = fTI_ADC1;
    fZOH2 = fTI_ADC1_1;
    fZOH3 = fTI_ADC1_2;
    {

        fGblControl_Digital = (1 - controle_ch_M);
        fGblControl_Digital_1 = (1 - controle_ch_B);

//*****Declaração de entradas*****

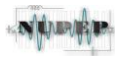
        Varm_s = fZOH1;
        Vret_sc = fZOH2;
        il_sc = fZOH3;

//*****Teste do funcionamento das chaves*****

        if (inicia_chaves == 1)
        {
            controle_ch_M = 0.5;
            controle_ch_B = 0.5;
        }
        if (reseta_chaves == 1)
        {
            controle_ch_M = 0;
            controle_ch_B = 0;
        }

//*****TESTE_FUNCIONAMENTO_DO_MOTOR*****

        if (inicia_motor == 2)
        {
            if (sentido_motor == 1)
            {
                controle_ch_M = teste_motor;
            }
        }
    }
}
```



```
    }
    if (sentido_motor == 0)
    {
        controle_ch_M = 0;
    }
}

//*****Controle de Velocidade do Motor_CC*****

if (inicia_leitura_armadura == 1)
{
    Varm_ant2 = Varm_ant1;
    Varm_ant1 = Varm;
    Varm = ((341.17 * Varm_s) - 499.39) * (-1);
    filter_vel_ant2 = filter_vel_ant1;
    filter_vel_ant1 = filter_vel;
    filter_vel = (b0*Varm) + (b1*Varm_ant1) + (b2*Varm_ant2) -
(a1*filter_vel_ant1) - (a2*filter_vel_ant2);
    Varm_f = (filter_vel*0.988) + 1.5746;
    Vel = (Varm_f * 8.9081) - 35.0775;
}

//*****Controle de Velocidade do Motor_CC*****

if ((inicia_leitura_armadura == 1) && (inicia_motor == 1))
{
    erro_Vel_ant = erro_Vel;
    erro_Vel = Vel_ref - Vel;
    Kvel_ant = Kvel;
    Kvel = (erro_Vel * (b0p)) + (erro_Vel_ant * (b1p)) - (Kvel_ant *
(a1p)) ;

    if (Kvel <= 0)
    {
        Kvel = 0;
    }
    if (Kvel >= 0.95)
    {
        Kvel = 0.95;
    }
    if (Vel_ref == 0)
    {
        Kvel = 0;
    }
}

//*****Chaveamento Chopper*****
    controle_ch_M = Kvel;
}

//*****
//*****Controle das Variáveis do Vento*****
/*if ((inicia_leitura_armadura == 1) && (inicia_vento == 1))
{
    if (segundos == 120)
    {
        segundos = 0;
    }

    contador = contador + 1;
}
```




```
if (contador >= 49999)
{
    contador = 0;
    segundos = segundos + 1;
}

if (i_v >= if_v)
{
    i_v = 0;
    omegai = 0;
    Vruido = 0;
}
i_v = segundos;
//*****Componente Constatnte*****
V_cte[i_v] = 300;
//*****Componente Rajada*****
div1_rj_ant = div1_rj;
div1_rj = i_v / T_rj;
div2_rj_ant = div2_rj;
div2_rj = Ti_rj / T_rj;
erro_rj_ant = erro_rj;
erro_rj = div1_rj - div2_rj;
prod1_rj_ant = prod1_rj;
prod1_rj = (1 - cos(erro_rj * 2 * pi));
prod2_rj_ant = prod2_rj;
prod2_rj = R_rj_max * 0.5;
mult_rj_ant = mult_rj;
mult_rj = prod1_rj * prod2_rj;

if ((i_v > Ti_rj) && (i_v < (Ti_rj + T_rj)))
{
    V_rj[i_v] = mult_rj;
}
else
{
    V_rj[i_v] = 0;
}
//*****Componente Rampa*****

erro1_rp_ant = erro1_rp;
erro1_rp = i_v - Tf_rp;
erro2_rp_ant = erro2_rp;
erro2_rp = Ti_rp - Tf_rp;
div_rp_ant = div_rp;
div_rp = erro1_rp / erro2_rp;
prod_rp_ant = prod_rp;
prod_rp = 1 - div_rp;
mult_rp_ant = mult_rp;
mult_rp = R_rp_max * prod_rp;

if ((i_v > Ti_rp) && (i_v < Tf_rp))
{
    V_rp[i_v] = mult_rp;
}
else
{
    V_rp[i_v] = 0;
}
```



```
//*****Componente Ruído*****

    omegai = (i_v + (0.5)) * dw;

    numerador1 = 2 * Kn * F * F * omegai;
    denominador1 = (1 + (((F * omegai) / (3.14159 * mi)) * ((F *
omegai) / (3.14159 * mi)))));
    denominador2 = pow(denominador1, expoente) + 0.001;
    Sv = ((numerador1) / ((pow(3.14159, 2)) * denominador2));
    fi = 2 * pi;
    fase_fi = rand() % fi;

    Vruído = Vruído + (pow((Sv * dw), 0.5)) * cos((omegai * i_v) +
(fase_fi));

    V_rd[i_v] = (2 * Vruído) * k_ruído;

//*****Componentes do Vento*****

    Vel_Vento1[i_v] = V_cte[i_v] + V_rj[i_v];
    Vel_Vento2[i_v] = V_cte[i_v] + V_rp[i_v];
    Vel_Vento3[i_v] = V_cte[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento4[i_v] = V_rj[i_v] + V_rp[i_v];
    Vel_Vento5[i_v] = V_rj[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento6[i_v] = V_rp[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento7[i_v] = V_cte[i_v] + V_rj[i_v] + V_rp[i_v];
    Vel_Vento8[i_v] = V_cte[i_v] + V_rj[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento9[i_v] = V_rj[i_v] + V_rp[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento[i_v] = V_cte[i_v] + V_rj[i_v] + V_rp[i_v] + V_rd[i_v];

    Var_Vento = V_rp[i_v];
    i_v = i_v + 1;
    if (reseta_cont == 1)
    {
        i_v = 0;
        segundos = 0;
    }

//*****Controle de Velocidade do Motor CC*****

    if (cat_vento == 0)
    {
        Vel_ref = 0;
    }
    if (cat_vento == 1)
    {
        Vel_ref = V_cte[i_v];
    }
    if (cat_vento == 2)
    {
```

```
        Vel_ref = V_rj[i_v];
    }
    if (cat_vento == 3)
    {
        Vel_ref = V_rp[i_v];
    }
    if (cat_vento == 4)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento1[i_v];
    }
    if (cat_vento == 5)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento2[i_v];
    }
    if (cat_vento == 6)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento3[i_v];
    }
    if (cat_vento == 7)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento4[i_v];
    }
    if (cat_vento == 8)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento5[i_v];
    }
    if (cat_vento == 9)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento6[i_v];
    }
    if (cat_vento == 10)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento7[i_v];
    }
    if (cat_vento == 11)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento8[i_v];
    }
    if (cat_vento == 12)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento9[i_v];
    }
    if (cat_vento == 13)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento[i_v];
    }
    erro_Vel_ant = erro_Vel;
    erro_Vel = Vel_ref - Vel;
    Kvel_ant = Kvel;
    Kvel = (erro_Vel * (b0p)) + (erro_Vel_ant * (b1p)) - (Kvel_ant
* (a1p)) ;
    if (Kvel <= 0)
    {
        Kvel = 0;
    }
    if (Kvel >= 0.95)
    {
        Kvel = 0.95;
    }
}
```

```
        if (Vel_ref == 0)
        {
            Kvel = 0;
        }

//*****Chaveamento Chopper*****

        controle_ch_M = Kvel;
    }*/

//*****
//*****MPPT com controle de Corrente por P&O*****

    if (inicia_boost == 1)
    {
        Vret_ant2 = Vret_ant1;
        Vret_ant1 = Vret;
        Vret = ((-274.82) * Vret_sc) + 408,12;
        filter_vret_ant2 = filter_vret_ant1;
        filter_vret_ant1 = filter_vret;
        filter_vret = (b0*Vret) + (b1*Vret_ant1) + (b2*Vret_ant2) -
(a1*filter_vret_ant1) - (a2*filter_vret_ant2);
        Vret_f = (filter_vret*0.988) + 1.5746;
        iL_ant2 = iL_ant1;
        iL_ant1 = iL;
        iL = (11.539 * iL_sc) - 17.154;
        filter_iL_ant2 = filter_iL_ant1;
        filter_iL_ant1 = filter_iL;
        filter_iL = (b0*iL) + (b1*iL_ant1) + (b2*iL_ant2) -
(a1*filter_iL_ant1) - (a2*filter_iL_ant2);

        iL_f = filter_iL;
        P = Vret_f * iL_f;
        cont_boost = cont_boost + 1;

        if (cont_boost >= 50000) //50k dividido por 1Hz
        {
            P = Vret_f * iL_f;
            Delta_iL = iL_f - iL_ant;
            Delta_P = P - P_ant;
            if (Delta_P == 0)
            {
                //Retorna;
            }
            else
            {
                if (Delta_P < 0)
                {
                    if (Delta_iL < 0)
                    {
                        iL_ref_MPPT = iL_ref_MPPT + incremento;
                    }
                    else
                    {
                        iL_ref_MPPT = iL_ref_MPPT - incremento;
                    }
                }
            }
            else
            {

```

```
        if (Delta_iL < 0)
        {
            iL_ref_MPPT = iL_ref_MPPT - incremento;
        }
        else
        {
            iL_ref_MPPT = iL_ref_MPPT + incremento;
        }
    }
    iL_ant = iL_f;
    P_ant = P;
    iL_ref = iL_ref_MPPT;

    cont_boost = 0;
}

if (iL_f >= 4.5)
{
    iL_f = 4.5;
}

if (iL_ref_MPPT >= 2)
{
    iL_ref_MPPT = 0;
}

//*****Controle de Corrente do Conversor Boost*****

erro_iL_ant = erro_iL;
erro_iL = iL_ref - iL_f;
KiL_ant = KiL;
KiL = KiL_ant + (bo_iL * erro_iL) + (b1_iL * erro_iL_ant);
if (KiL <= 0)
{
    KiL = 0;
}
if (KiL >= 0.95)
{
    KiL = 0.95;
}

//*****Chaveamento do Conversor Boost*****

    controle_ch_B = KiL;
}
}
#ifdef _DEBUG
    fGblCh_Chopper = fGblControl_Digital;
#endif
#ifdef _DEBUG
    fGblCh_Boost = fGblControl_Digital_1;
#endif
    PS_ExitTimer1Intr();
}
interrupt void Task_1()
{
    PS_EnableIntr();
    PS_SetPwm2Rate(fGblControl_Digital_1);
```



```
    PS_ExitPwm2General();
}

interrupt void Task_2()
{
    PS_EnableIntr();
    PS_SetPwm1Rate(fGblControl_Digital);
    PS_ExitPwm1General();
}

void Initialize(void)
{
    PS_SysInit(30, 10);
    PS_StartStopPwmClock(0);
    PS_InitTimer(0, 0xffffffff);
    PS_InitPwm(1, 0, 1000*1, 0*1e6, PWM_POSI_ONLY, 28386); // pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
    PS_SetPwmPeakOffset(1, 1, 0, 1.0/1);
    PS_SetPwmIntrType(1, ePwmNoAdc, 1, 0);
    PS_SetPwmVector(1, ePwmNoAdc, Task_2);
    PS_SetPwm1Rate(0);
    PS_StartPwm(1);

    PS_InitPwm(2, 0, 2500*1, 0*1e6, PWM_POSI_ONLY, 11840); // pwnNo,
waveType, frequency, deadtime, outtype
    PS_SetPwmPeakOffset(2, 1, 0, 1.0/1);
    PS_SetPwmIntrType(2, ePwmNoAdc, 1, 0);
    PS_SetPwmVector(2, ePwmNoAdc, Task_1);
    PS_SetPwm2Rate(0);
    PS_StartPwm(2);

    PS_ResetAdcConvSeq();
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 0, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 1, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 2, 1.0);
    PS_AdcInit(0, !0);

    PS_InitTimer(1,20);
    PS_SetTimerIntrVector(1, Task);
    PS_StartStopPwmClock(1);
}

void main()
{
    Initialize();
    PS_EnableIntr(); // Enable Global interrupt INTM
    PS_EnableDbgm();
    for (;;) {}
}
```

APÊNDICE B – ADVERSIDADES NO USO DO ENCODER INCREMENTAL DYNAPAR B58N

Inicialmente a primeira maneira que foi realizada a leitura de velocidade do motor foi por um dispositivo denominado *encoder*. Esse dispositivo é acoplado diretamente no eixo da máquina e tem a capacidade de analisar a rotação do motor a partir da leitura de pulsos emitidos por ele a cada rotação completa do eixo do motor, onde, esse sinal é denominado por Z. O encoder também fornece mais dois sinais de referência denominados por *encoder A* e *encoder B*, os mesmos tem a função de informar para qual direção o motor está girando, seja ela no sentido horário ou sentido anti-horário e são defasadas entre si por um ângulo de 90°.

De posse dessas informações foi utilizado um *encoder* incremental, da *Dynapar* modelo B58N, fornecido pelo laboratório NUPEP para que pudesse ser feito a leitura de velocidade do motor. Como o dispositivo fornece sinais que necessitam de interpretação lógica para a análise da velocidade, foi feito as configurações necessárias para essa interpretação.

As saídas de sinais do *encoder* são na faixa de 0 a 5V e como o microprocessador utilizado opera na faixa de 0 3,3V foi necessário elaborar um circuito que reduziria o nível desses sinais sem que houvesse perda de informações. Com isso, foi montado um circuito simples com transistores com alimentação em 3,3V que conseguiu, sem perda de informações, adaptar os sinais na faixa de operação do microprocessador. Esses sinais eram interligados em portas específicas do DSP que por sua vez foi elaborado o código que realizava a leitura de velocidade do motor. O circuito elaborado é apresentado na Figura B.1.

A conexão entre o *encoder* e o eixo do motor foi feito a partir de um acoplamento de mola, que aparentemente deveria amortecer as vibrações causadas pelo funcionamento do motor para que isso não atrapalhasse a leitura de velocidade. Esse acoplamento é demonstrado na Figura B.2.

Figura B.2 – *Encoder* com acoplamento de mola utilizado.



Como o motor não possui uma base fixa, o funcionamento do mesmo gerava muita vibração que por sua vez não permitia o *encoder* fazer de maneira correta as leituras de velocidade que influenciava no controle imposto, não ocorrendo o funcionamento desejado. Percebendo que a vibração estava influenciando nas leituras de velocidade, foi feito outro acoplamento para o *encoder*, dessa vez sem a mola no acoplamento, mas mesmo assim a vibração persistiu de uma forma mais branda, porém ainda interferindo nos resultados. O acoplamento sem mola utilizado é apresnetado na Figura B.3.

Figura B.3 – *Encoder* com acoplamento sem mola utilizado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Como as leituras não estavam sendo feitas da maneira desejada por causa de interferências mecânicas optou-se por elaborar outra técnica, que de uma maneira indireta conseguiu fazer a leitura da velocidade do eixo do motor CC.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO EMULADOR
DE UMA TURBINA EÓLICA**

DIEGO LUIZ MONTEIRO COSTA

Uberlândia

2019

DIEGO LUIZ MONTEIRO COSTA

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO EMULADOR
DE UMA TURBINA EÓLICA**

Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal de Uberlândia – Núcleo de Pesquisas em Eletrônica de Potência (NUPEP), perante a banca de examinadores como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Ciências.

Área de concentração: Energias Renováveis.
Orientador: Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas.
Co-Orientador: Dr. Gustavo Brito de Lima.

Banca Examinadora:

Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas (UFU)

Dr. Gustavo Brito de Lima (UFU)

Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende (UFU)

Dr. Danilo Borges Rodrigues (UFTM)

A Bolsa de Estudos para esta pesquisa foi concedida pela CAPES - Brasil.

Uberlândia

2019

DIEGO LUIZ MONTEIRO COSTA

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO EMULADOR DE
UMA TURBINA EÓLICA**

Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal de Uberlândia – Núcleo de Pesquisas em Eletrônica de Potência (NUPEP), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Ciências.

Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas
Orientador

Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior
Coordenador da Pós-Graduação

Uberlândia
2019

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Elcione e Erenicia,
ao meu irmão Elcione Junior,
à minha avó materna Neli,
à minha noiva Bruna,
à toda minha família e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre ao meu lado me guiando e me colocando no caminho certo, fugindo dos grandes perigos, no intuito de me orientar no caminho que se encontram meus objetivos de vida tanto pessoal quanto profissional.

Agradeço aos meus pais, Elcione e Erenicia, ao meu irmão Elcione Junior e a minha avó Neli, que independentemente da situação nunca mediram esforços para me apoiar na busca pelos meus sonhos, me aconselhando e dando forças para que eu pudesse sempre continuar a minha jornada de vida. Reconheço todo esforço feito pela minha família em prol da minha educação, sempre com compreensão, carinho e amor almejando sempre o melhor para mim em cada situação.

Agradeço a minha noiva Bruna que está sempre do meu lado, mesmo nas situações mais adversas sempre me apoiou. Obrigado por todo amor, companheirismo e paciência em todos os momentos que tive que me ausentar para dedicação aos meus estudos. Também agradeço por todo apoio vindo da sua família, principalmente seus pais, Luiz Roberto e Marlene, que sempre acreditaram em mim, me incentivando a alcançar meus objetivos.

Aos meus familiares que mesmo distantes torceram e forneceram todo suporte disponível para que eu pudesse ir cada vez mais ao alcance dos meus sonhos.

Aos professores, colaboradores e orientadores, Luiz Carlos Gomes de Freitas, Gustavo Brito de Lima e Danilo Borges Rodrigues, pela confiança depositada e pela contribuição e conselhos fornecidos durante todo trabalho.

Aos meus amigos de laboratório Gustavo, Bárbara, Joaquim, Mateus, Júlio, Lucas, Claudio, Paulo, Ana Caroline, Augusto, Aline, Henrique, Antônio, Fernando, Rodrigo, muito obrigado pela convivência, conselhos e ensinamentos os quais carregarei sempre comigo.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior pelo suporte financeiro durante toda a pesquisa.

A todos que de uma forma direta ou indireta colaboraram com minha formação acadêmica, tanto pessoal quanto profissional, o meu muito obrigado.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”.

Theodore Roosevelt

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a análise e implementação de um emulador de turbina eólica em pequena escala. O sistema é composto por um conjunto motor-gerador, que tem a função de emular o sistema eólico, um retificador e um conversor *Boost*, estes responsáveis pela extração de energia do grupo motor-gerador. Para emulação da turbina eólica utilizou-se um motor CC (corrente contínua) acoplada a um gerador síncrono trifásico. Um *Chopper* CC-CC foi utilizado para controlar a rotação do motor CC, possibilitando acionar o gerador síncrono de acordo com diferentes perfis de vento, emulando uma turbina eólica. O retificador trifásico tem a função de retificar as tensões de saída do gerador síncrono e o conversor *Boost* (conectado em cascata com o retificador) é responsável por controlar a potência extraída do grupo motor-gerador. A técnica MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) utilizada para extração de potência que melhor atendeu as características do sistema foi a P&O (Perturbe e Observe) clássico. Com a extração da máxima potência do conjunto foi possível alimentar um barramento CC que poderá ser utilizado em diversas aplicações.

Palavras Chaves: Emulador de uma Turbina Eólica, Motor CC, Máquina Síncrona, Retificador Trifásico, Conversor Boost.

ABSTRACT

The present work aims to analyze a wind turbine emulator in a laboratory scale. The purpose of this system was to reproduce on a small scale the disturbances suffered in the generation of wind energy and to analyze in a detailed way these phenomena. In order to the system recognizes the main parameters derived from the wind force caused by the wind turbine, a properly controlled DC (direct current) motor was used, emulating what actually occurs in the wind energy generation system. The properly controlled wind disturbances were noticed at the speed of rotation of the DC motor axis. The generation of electric energy was made by using a three-phase synchronous machine, in the configuration of a generator, which provided the power variations delivered by the motor in the form of alternating voltages and currents. In order to control these voltages and currents provided by the synchronous machine, a three-phase rectifier was built with the objective of transforming the alternating electric quantities to continuous. Allocated the rectifier in series with the synchronous machine was built a DC-DC Boost converter in order to control the power generated by the system. The Boost converter was properly controlled and a Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique was implemented. The MPPT technique that best met the characteristics of the system was the technique of P&O (Perturb and Observe) classic. With the extraction of maximum power made in the system, this energy was delivered to a DC busbar that could be used in several applications.

Keywords: Emulator of a Wind Turbine, DC Motor, Synchronous Machine, Three Phase Rectifier, Boost Converter.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - CAPACIDADE E CRESCIMENTO GLOBAL DA ENERGIA EÓLICA NOS ANOS DE 2005 E 2024.....	19
FIGURA 1.2 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA ATUALIZADA EM FEVEREIRO DE 2019... 20	
FIGURA 2.1 – SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA.	25
FIGURA 2.2 – TURBINA EÓLICA COM VELOCIDADE FIXA.	26
FIGURA 2.3 – TURBINA EÓLICA COM DEFIG DE VELOCIDADE VARIÁVEL.....	27
FIGURA 2.4 – TURBINA COM PMSG DE VELOCIDADE VARIÁVEL.	28
FIGURA 2.5 – DIAGRAMA DE UM SISTEMA DE MPPT COM TABELA DE BUSCAS.....	31
FIGURA 2.6 – GRÁFICO GENERALIZANDO O PRINCÍPIO DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA.....	32
FIGURA 2.7 – C_p EM RELAÇÃO AO TSR PARA DIVERSAS VELOCIDADE DE VENTO E DE ROTAÇÃO DA TURBINA.....	33
FIGURA 2.8 – ESTRUTURA DO SISTEMA EÓLICO CONSTITUÍDO POR UM MOTOR CC CONECTADO A UMA MÁQUINA SÍNCRONA COM SEU SISTEMA DE CONTROLE.	34
FIGURA 3.1 – TOPOLOGIA BÁSICA DE UM MOTOR CC.	37
FIGURA 3.2 – DIAGRAMA DE BLOCOS RELACIONANDO VELOCIDADE E CORRENTE NA ARMADURA.....	38
FIGURA 3.3 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO MOTOR CC COM ENTRADA DE TENSÃO E SAÍDA COMO VELOCIDADE.	39
FIGURA 3.4 – CURVA DE DESACELERAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR GERADOR.....	41
FIGURA 3.5 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO MOTOR CC SEM CONTROLE.....	42
FIGURA 3.6 – CONVERSOR CLÁSSICO CC-CC <i>BOOST</i>	44
FIGURA 3.7 – MÁQUINA SÍNCRONA EM SÉRIE COM RETIFICADOR E CONVERSOR <i>BOOST</i> . .	47
FIGURA 3.8 – ESQUEMÁTICO DO CONVERSOR <i>BOOST</i> MODELADO.	47
FIGURA 3.9 – PRIMEIRA ETAPA DE ATUAÇÃO DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	48
FIGURA 3.10 – SEGUNDA ETAPA DE ATUAÇÃO DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	49
FIGURA 4.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS QUE REPRESENTA O CONTROLE DO MOTOR CC.....	55
FIGURA 4.2 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES E OS DIAGRAMAS DE BODE DO MOTOR NÃO CONTROLADO.	56
FIGURA 4.3 – RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO DO MOTOR CC SEM COMPENSADOR.	57
FIGURA 4.4 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES E OS DIAGRAMAS DE BODE DO MOTOR COM COMPENSADOR.	58

FIGURA 4.5 – RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO COM COMPENSADOR.	58
FIGURA 4.6 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO MPPT P&O UTILIZADO.	60
FIGURA 4.7 – GRÁFICO INFORMANDO VALORES MÍNIMO E MÁXIMO DE UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE.....	62
FIGURA 4.8 – POTÊNCIA ELÉTRICA E MECÂNICA EM RELAÇÃO A CORRENTE DE SAÍDA.....	63
FIGURA 4.9 – DIAGRAMA DE BLOCOS REPRESENTANDO O CONTROLE DE CORRENTE DE ENTRADA.	64
FIGURA 4.10 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES E OS DIAGRAMAS DE BODE DA PLANTA NÃO CONTROLADA.	64
FIGURA 4.11 – RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO DO SISTEMA NÃO CONTROLADO.....	65
FIGURA 4.12 – LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES E OS DIAGRAMAS DE BODE COM COMPENSADOR NO SISTEMA.....	66
FIGURA 4.13 – RESPOSTA DO SISTEMA COM COMPENSADOR AO DEGRAU UNITÁRIO.	67
FIGURA 5.1 – CIRCUITO DE POTÊNCIA E DIAGRAMA DE CONTROLE NA PLATAFORMA COMPUTACIONAL MATLAB®.....	69
FIGURA 5.2 – COMPONENTE RAJADA DO VENTO.	71
FIGURA 5.3 – COMPONENTE RAMPA DO VENTO.	72
FIGURA 5.4 – MODELO DO MOTOR CC UTILIZADO DO SOFTWARE DE SIMULAÇÃO.....	73
FIGURA 5.5 – VELOCIDADE DE ROTAÇÃO CONTROLADA DO MOTOR CC.....	74
FIGURA 5.6 – MOTOR EMULANDO AS COMPONENTES DO VENTO.....	75
FIGURA 5.7 – TENSÃO GERADA ENTRE DUAS FASES DA MÁQUINA SÍNCRONA.	76
FIGURA 5.8 – CORRENTE GERADA EM UMA DAS FASES DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	76
FIGURA 5.9 – NÍVEL DE TENSÃO NA SAÍDA DO RETIFICADOR TRIFÁSICO.	77
FIGURA 5.10 – CONVERSOR <i>BOOST</i> E SEU CONTROLE.	78
FIGURA 5.11 – RESPOSTA DO CONTROLE ESTIPULADO NO CONVERSOR <i>BOOST</i>	79
FIGURA 5.12 – TENSÃO NA SAÍDA DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	79
FIGURA 5.13 – SISTEMA COMPLETO MONTADO.....	80
FIGURA 5.14 – PROTÓTIPO EMULADOR EÓLICO CONSTRUÍDO.	81
FIGURA 5.15 – CIRCUITO DA PONTE H.....	82
FIGURA 5.16 – CIRCUITO DO <i>CHOPPER</i> UTILIZADO.....	83
FIGURA 5.17 – COMPONENTE CONSTANTE DO VENTO VISTO PELO MOTOR.....	87
FIGURA 5.18 – COMPONENTE RAJADA DO VENTO VISTO PELO MOTOR.	88
FIGURA 5.19 – COMPONENTE RAMPA DO VENTO VISTO PELO MOTOR.	88
FIGURA 5.20 – COMPONENTES CONSTANTE, RAJADA E RAMPA VISTOS PELO MOTOR.	89

FIGURA 5.21 – TENSÃO VISTA NA ARMADURA DO MOTOR CC.	90
FIGURA 5.22– TENSÃO NO CIRCUITO DE CAMPO DO MOTOR CC.	91
FIGURA 5.23 – TENSÕES TRIFÁSICAS NA SAÍDA DA MÁQUINA SÍNCRONA.	92
FIGURA 5.24 – CORRENTES TRIFÁSICAS NA SAÍDA DA MÁQUINA SÍNCRONA.	92
FIGURA 5.25 – ONDAS DE TENSÃO E CORRENTE NA SAÍDA DO RETIFICADOR TRIFÁSICO. .	94
FIGURA 5.26 – TENSÃO E CORRENTE NA ENTRADA DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	95
FIGURA B.1 – CIRCUITO PARA CONVERSÃO DE 0 – 5V PARA 0 – 3,3V.	115
FIGURA B.2 – <i>ENCODER</i> COM ACOPLAMENTO DE MOLA UTILIZADO.	115
FIGURA B.3 – <i>ENCODER</i> COM ACOPLAMENTO SEM MOLA UTILIZADO.....	116

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS TURBINAS DE VELOCIDADE FIXA E VARIÁVEL.	22
TABELA 2.1 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TURBINAS DE VELOCIDADE FIXA E VARIÁVEL.	29
TABELA 3.1 – ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR CC UTILIZADO.	43
TABELA 3.2 – ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR TRIFÁSICO UTILIZADO	43
TABELA 3.3 – PARÂMETROS DO PROJETO DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	45
TABELA 5.1 – PARÂMETROS DOS PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS NO PROTÓTIPO.	81
TABELA 5.2 – PLACA DO <i>GATE DRIVER SIMPLES</i>	83
TABELA 5.3 – PLACA DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO <i>GATE DRIVER</i>	84
TABELA 5.4 – PLACA DSP TMS320F28335 DA <i>TEXAS INSTRUMENTS</i> [®]	84
TABELA 5.5 – ESPECIFICAÇÕES DA PLACA DE CONVERSÃO DE SINAIS DE 3,3 V PARA 15 V.	85
TABELA 5.6 – MÓDULO PARA AQUISIÇÃO E CONDICIONAMENTO DE SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Ampère, unidade de corrente elétrica
A/D	Conversor analógico / digital
Amed	Matriz de sistema média
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
Bmed	Matriz de entrada média
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
Cint	Capacitor de entrada do conversor CC-CC <i>Boost</i>
CVpv(s)	Função de transferência do compensador de tensão do conversor
D	Diodo do conversor
Dinicial	Razão cíclica na condição inicial do escaneamento
Dfinal	Razão cíclica na condição final do escaneamento
Dmp	Razão cíclica de máxima potência
DVoc	Razão cíclica de tensão de circuito aberto
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
fmppt	Frequência de atualização do algoritmo MPPT P&O
fs	Frequência de chaveamento
GMPP	<i>Global Maximum Power Point</i>
GPWM(s)	Função de transferência do modulador PWM
GVpv_D(s)	Função de transferência da tensão de entrada em relação à razão cíclica de chaveamento do conversor
Hv(s)	Função de transferência do sensor de tensão

Hz	Hertz, unidade de frequência
$i_L(t)$	Corrente no indutor do conversor
I_{max_in}	Corrente máxima de entrada do conversor
I_{mp}	Corrente de máxima potência
ISC	Corrente de curto-circuito
I-V	Curva corrente x tensão do sistema eólico
kHz	Kilohertz, unidade de frequência
kW	Kilowatt, unidade de potência ativa
L	Indutor do conversor
MCC	Modo de Condução Contínuo
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
mH	Milihenry, unidade de indutância
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
ms	Milissegundo, unidade de tempo
NUPEP	Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência
P&O	Perturbe e Observe
PID	Compensador Proporcional Integral Derivativo
PMP	Ponto de máxima potência
P-V	Curva potência x tensão do sistema eólico
PWM	<i>Pulse With Modulate</i>
RL	Resistência representativa das perdas no indutor do conversor
RS	Resistência representativa das perdas de condução do conversor
Ro	Impedância de saída da <i>string</i> para irradiância máxima

S	Interruptor do conversor
T_s	Período de chaveamento
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
$u(t)$	Vetor de entrada
V	Volt, unidade de tensão elétrica
VDB	Queda de tensão no diodo do conversor
V_o	Tensão do barramento CC
V_{max_in}	Tensão máxima de entrada do conversor
V_{mp}	Tensão de máxima potência
V_{ref}	Tensão de referência da técnica de MPPT P&O
$x(t)$	Vetor de estados
W	Watt, unidade de potência ativa
°C	Graus Celsius, unidade de temperatura
ΔD	Passo de razão cíclica no escaneamento
ΔI	Ondulação de corrente (%) no indutor do conversor
ΔV	Passo de perturbação da tensão
ΔV_{ret}	Ondulação de tensão (%) no capacitor do conversor
Ω	Ohm, unidade de resistência elétrica
μF	Microfarad, unidade de capacitância
μs	Microssegundo, unidade de tempo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2. ESTADO DA ARTE	25
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
2.2. TOPOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA.....	25
2.2.1. TIPOS DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA	26
2.3. RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT).....	30
2.3.1. TÉCNICAS DE MPPT PARA O SISTEMA EÓLICO	30
2.4. ESTRUTURA PROPOSTA NO TRABALHO	34
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
3. ESPECIFICAÇÕES, MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DO SISTEMA	36
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	36
3.2. DETERMINAÇÕES DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	36
3.2.1. ESPECIFICAÇÕES DOS PARÂMETROS DO MOTOR CC UTILIZADO.....	39
3.3. ESPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	43
3.4. ESPECIFICAÇÕES DO RETIFICADOR TRIFÁSICO UTILIZADO	44
3.5. DETERMINAÇÕES DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC BOOST	44
3.5.1. MODELAGEM DO CONVERSOR CC-CC BOOST	46
3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO SISTEMA	55
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	55
4.2. COMPENSADOR DE VELOCIDADE NO MOTOR CC.....	55
4.3. ESTRATÉGIA MPPT UTILIZADA NO CONVERSOR BOOST	59

4.4.	CARACTERÍSTICAS DE MÁXIMA POTÊNCIA EM UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE	61
4.5.	COMPENSADOR DE CORRENTE DO CONVERSOR BOOST.....	63
4.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5.	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS.....	68
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	68
5.2.	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA	68
5.2.1.	COMPONENTES DO VENTO	70
5.2.2.	MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	73
5.2.3.	MÁQUINA SÍNCRONA	75
5.2.4.	RETIFICADOR TRIFÁSICO.....	77
5.2.5.	CONVERSOR <i>BOOST</i>	78
5.3.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	80
5.3.1.	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO E SUAS ESPECIFICAÇÕES	80
5.3.2.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DAS COMPONENTES DO VENTO NO PROTÓTIPO	86
5.3.3.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL NA MÁQUINA CC	90
5.3.4.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO RETIFICADOR TRIFÁSICO	93
5.3.5.	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONVERSOR BOOST	94
5.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
6.	CONCLUSÕES GERAIS.....	97
	REFERÊNCIAS	99
	PUBLICAÇÃO DOS AUTORES ASSOCIADOS À PESQUISA.....	102
	APÊNCIDE A – CÓDIGO EMBARCADO NO DSP320F28335 PARA CONTROLE DO PROTÓTIPO	103
	APÊNDICE B – ADVERSIDADES NO USO DO ENCODER INCREMENTAL DYNAPAR B58N.....	114

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente, aumento de custos e a necessidade por reservas cada vez maiores em meio ao aumento da demanda de energia, ocasionou uma diminuição na utilização dos combustíveis fósseis, chamando a atenção de pesquisadores, governos e indústrias para desenvolvimento e aprimoramento de novas fontes de energia sustentáveis. Assim, o desenvolvimento de novas técnicas no processamento de energia, os estímulos governamentais e a diminuição nos preços têm motivado as fontes de energia se tornarem mais atraentes ao mercado. Entre as fontes de energia renováveis a energia eólica é a que mais cresce atualmente (TAVEIROS, 2014).

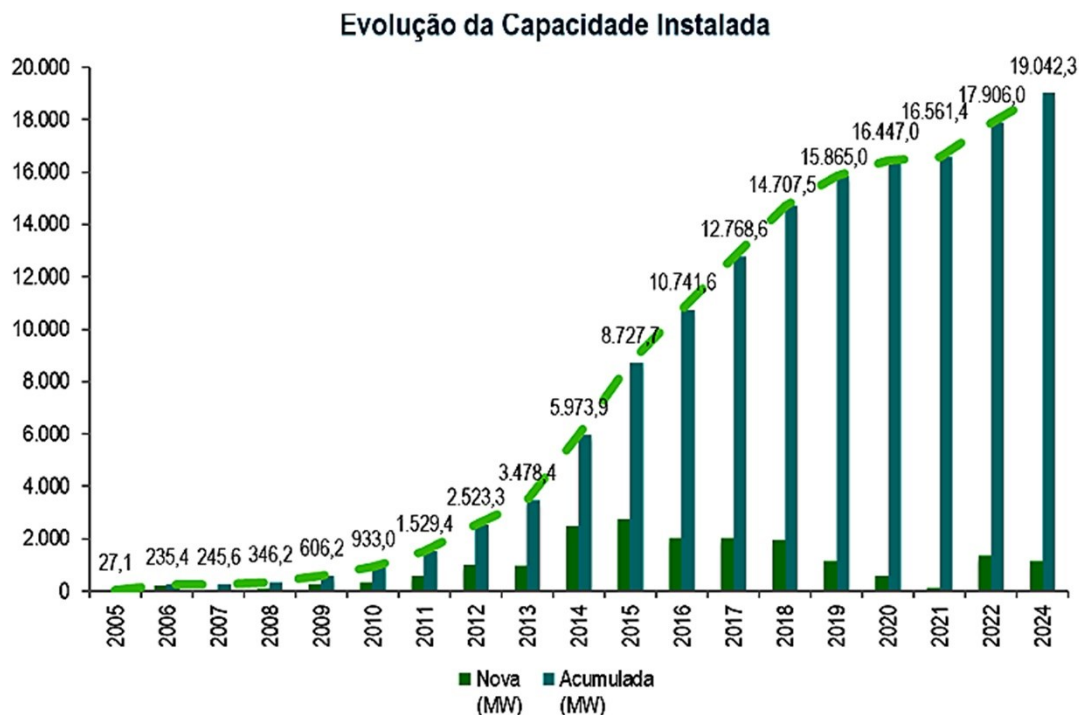
Por se tratar de uma preocupação global, países ao redor do mundo estão avançando os estudos em projetos eólicos, começando pela investigação de novas técnicas nas pesquisas até a instalação de parques eólicos. Por se tratar de um recurso limpo e eficaz, a energia eólica se torna uma grande alternativa para o crescimento da demanda energética do país. Pesquisas na prospecção de energia relatam que a eólica pode chegar a colaborar com 12% de todo consumo mundial de energia até o ano de 2020, tendo potencial desse número subir para 22% até o ano de 2030 (SHAFIEI, 2012).

Nos últimos anos no território brasileiro, a energia eólica vem contribuindo cada vez mais na demanda energética do país. A criação do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) e do Ministério das Minas e Energia no ano de 2004, avaliou que essa fonte de energia alcançasse 5,9% da produção nacional. Mesmo o Brasil possuindo um grande potencial eólico, o crescimento dessa tecnologia se torna tardio pelo fato da matriz energética do país ser principalmente composta pela geração hidráulica. Mesmo causando um grande impacto ambiental, a geração hidráulica ainda é vista como uma fonte de energia renovável (BARROS C. M., 2011) (BARROS L. S., 2006).

O aumento significativo da fonte eólica no Brasil tem sido importante para a demanda energética do país, contudo ainda está longe de alcançar todo seu potencial. As pesquisas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) mostram que o país tem um potencial de 300 GW de geração eólica, condizendo com 2,2 vezes a matriz elétrica brasileira (CASADOSVENTOS, 2017).

A Figura 1.1 mostra a capacidade e o crescimento da energia eólica instalada entre os anos de 2005 e 2024. Apesar de lento, observa-se uma clara expansão na adoção desse tipo de energia renovável.

Figura 1.1 - Capacidade e crescimento global da energia eólica nos anos de 2005 e 2024.

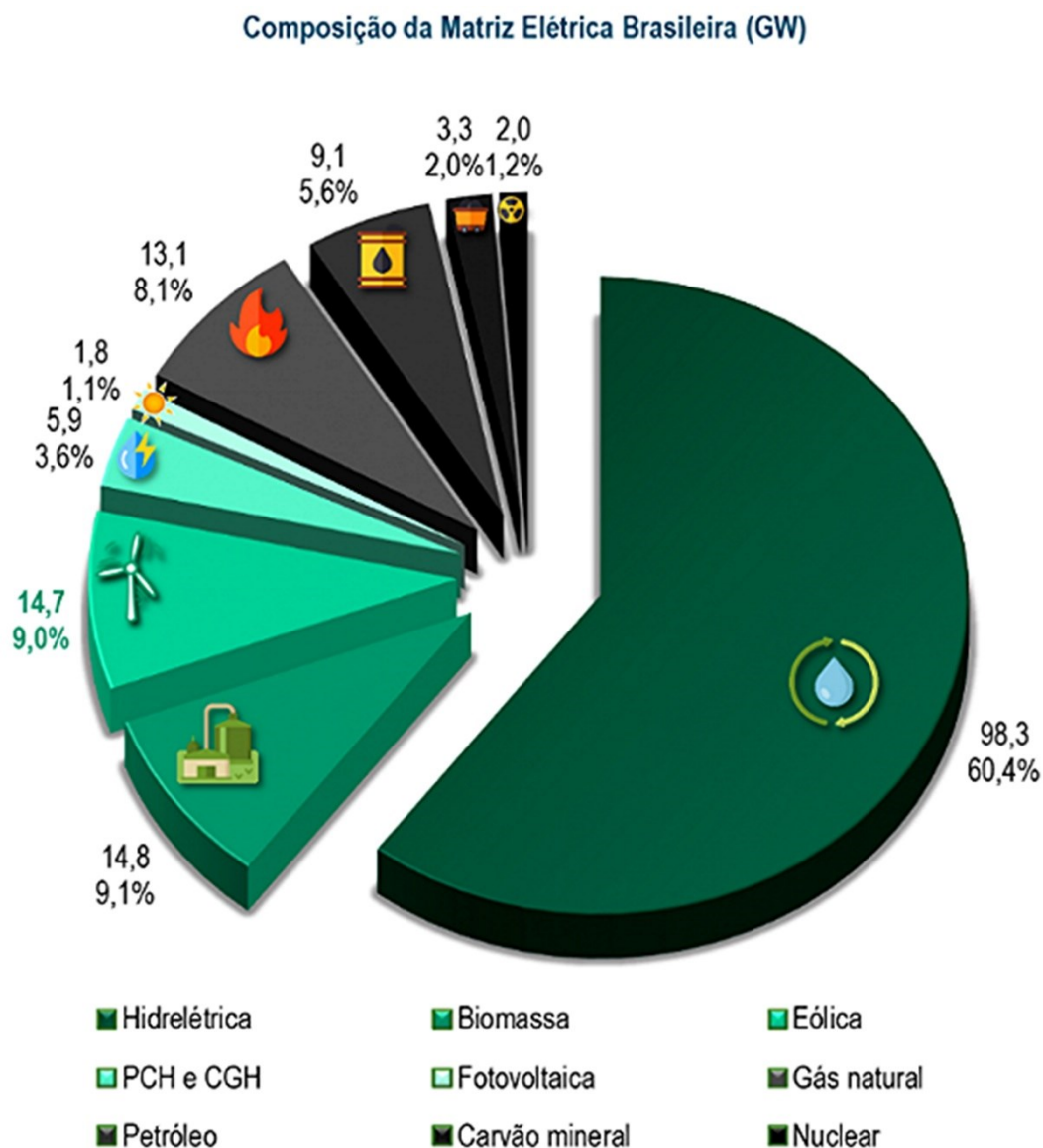


Fonte: (ABEEólica, 2019).

O gráfico da Figura 1.1 mostra dois tipos de dados. O primeiro informa as novas fontes de geração de energia eólica instaladas no país, já o segundo tipo informa a potência acumulada ao decorrer dos anos, transparecendo o aumento da capacidade instalada desse tipo de energia no país. Percebe-se que entre os anos de 2017 e 2018 houve um aumento na produção de energia elétrica a um nível superior a 1,9GW. Esse número ainda é muito pequeno quando comparado a toda capacidade do país, tendo em vista que o Brasil possui um grande território e com área de grande incidência de ventos capazes de gerar potência elétrica considerável.

A Figura 1.2 ilustra os principais tipos de geração de energia elétrica do Brasil, ressaltando o índice da energia eólica em relação aos outros tipos de geração de fontes de energia renováveis.

Figura 1.2 – Matriz energética brasileira atualizada em fevereiro de 2019.



Fonte: (ABEEólica, 2019).

Como pode ser visto no gráfico presente na Figura 1.2, a grande expansão da geração eólica permitiu que ela alcançasse praticamente os mesmos níveis da geração pela biomassa, representando 9,0% e 9,1%, respectivamente, da matriz energética brasileira em 2019. Por ser um recurso em abundância em muitas regiões litorâneas do território brasileiro, a energia elétrica proveniente da força dos ventos tem toda capacidade de ser o recurso renovável capaz de diminuir o uso da energia vinda das hidrelétricas, que representa a principal fonte de energia do país com 60,4%.

As turbinas podem ser divididas a partir de dois modos: velocidade fixa ou velocidade variável. Quando o gerador é conectado diretamente à rede elétrica e essa

impõe sua velocidade síncrona, esses modelos são caracterizados por turbinas de velocidade fixa. Quando ocorre o controle da velocidade síncrona do gerador por algum mecanismo de eletrônica de potência, são os modelos definidos por turbinas de velocidade variável. As turbinas de velocidade variável se destacam por aproveitarem melhor a energia disponível, diminuir o estresse na estrutura mecânica, diminuir ruídos e pela oportunidade de monitorarem as potências ativa e reativa do gerador (BARROS L. S., 2006).

Além disso, as turbinas de velocidade variável podem ajustar frequentemente sua velocidade de rotação síncrona à velocidade do vento disponível, possibilitando assim, uma maior eficiência na conversão de energia para várias velocidades de vento. Fazendo isso, o índice de velocidade de ponta, definido como a razão entre a velocidade da ponta da lâmina para a velocidade do vento, consegue se manter impecável para atingir a máxima eficiência de conversão de energia em diversas velocidades do vento. Para conseguir que a velocidade da turbina se torne adaptável, o gerador da turbina é conectado à rede elétrica por um conversor. Esse conversor possibilita o controle da velocidade do gerador que está mecanicamente conectado ao rotor (pás) da turbina eólica (REIS, 2013).

Outra vantagem das turbinas de velocidade variável é o aumento da produção de energia eólica, uma energia de melhor qualidade e um desgaste mecânico menor comparado as turbinas de velocidade fixa. Por outro lado, este tipo de turbina apresenta algumas desvantagens quando comparada as turbinas de velocidade fixa, como por exemplo, o aumento da produção de perdas de energia e um elevado custo devido ao uso de conversores de potência. Entretanto, as perdas de energia e o custo adicional são compensados pela maior produção de energia elétrica. Na Tabela 1.1 são apresentadas as principais características das turbinas de velocidade variável e de velocidade fixa.

No âmbito da pesquisa especificamente, salienta-se alguns projetos nos quais desejam alcançar: aquisição de topologias mais atraentes nos aspectos construtivos e operacionais; melhoria no processamento de energia e sua conversão em associação as suas estratégias operacionais; análises das situações transitórias, dinâmicas e em regime permanente realizada em ambientes computacionais e laboratoriais; análise operativa dos centros eólicos na conexão com as redes de energia; entre outros. Todos esses temas são partes no desenvolvimento de um tipo de energia, que raramente era abordado no Brasil, exceto por alguns pesquisadores e pequenas aplicações (ALVARENGA, 2012).

Tabela 1.1 - Principais características das turbinas de velocidade fixa e variável.

MODO DE VELOCIDADE	VANTAGENS	DESVANTAGENS
VELOCIDADE FIXA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simples, robusto e confiável; ▪ Baixo custo e manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relativamente baixa eficiência de conversão de energia; ▪ Alta tensão mecânica; ▪ Flutuações de potência para a rede elétrica.
VELOCIDADE VARIÁVEL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta eficiência na conversão de energia; ▪ Melhoria da qualidade de energia; ▪ Estress mecânico. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Custos e perdas devido ao uso de conversores adicionais; ▪ Sistema de controle mais complexo

Fonte: (REIS, 2013).

Em relação aos cuidados fundamentais em relação ao tema, a ligação de centrais eólicas ao sistema elétrico é gerenciada pelas condições impostas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Essa ligação pode ocasionar impactos nos indicadores de qualidade da energia em dois grupos. A princípio, o parque eólico influencia a rede elétrica e essa afeta o desempenho na unidade de geração, no qual ele não funciona isoladamente, mas certamente, ligado a um ponto do sistema elétrico de potência. O segundo grupo evidencia a chance da conexão acontecer próximo ao barramento de baixo nível de curto circuito, situação desfavorável para o tema mencionado (ALVARENGA, 2012).

Diante dessa problemática, viu-se necessário cada vez mais a elaboração de processos que avaliem e que permitam investigar os impactos da interligação das unidades eólicas junto ao sistema elétrico comercial. A partir disso, alternativas foram sendo desenvolvidas para um melhor entendimento dos fenômenos da geração eólica, como, por exemplo, a implementação de estruturas laboratoriais que constituem um aerogerador em consonância com os arranjos reais e consequentemente a implementação em forma de protótipo em escala reduzida que permitam reproduzir os fenômenos relevantes da geração de energia elétrica. Diante da necessidade de analisar os fenômenos da geração eólica e reconhecendo a identidade de laboratórios que utilizam túneis de vento, turbinas, geradores e conversores em concordância com instalações reais, surge também a opção de uma estrutura em escala ainda mais reduzida.

Objetivando uma maior simplicidade construtiva, sem perder as características da geração eólica, optou-se pela substituição dos túneis de vento por motores de corrente

contínua ou de indução devidamente controlados a fim de reproduzir as características da fonte de energia primária, ou seja, o vento.

Desta forma, esta pesquisa propõe a construção de uma estrutura laboratorial, em escala reduzida, de uma unidade de conversão eólica a velocidade variável. O modelo construído será capaz de emular o comportamento dos ventos a partir do controle da velocidade do motor de corrente contínua e a geração de energia será otimizada com a utilização de uma das técnicas de rastreamento de máxima potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking) injetando energia em um barramento CC.

1.1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho divide-se da seguinte forma: no capítulo 2 será apresentado o estado da arte contendo as principais pesquisas referentes aos princípios de funcionamento de sistemas eólicos com a utilização de técnicas de controle para uma melhor utilização da energia eólica. Será apresentado também a estrutura completa do sistema, que é composta por um motor CC e seu controle de velocidade e uma máquina síncrona trifásica acoplada ao eixo do motor CC. Conectado aos terminais do gerador síncrono tem-se um retificador não controlado cascadeado com um conversor CC-CC *Boost*, este último responsável pelo MPPT.

No capítulo 3 serão apresentados as especificações, a modelagem matemática e o dimensionamento dos parâmetros do motor CC, da máquina síncrona, do retificador trifásico e do conversor CC-CC *Boost* aplicado ao sistema eólico para extração de potência. A modelagem será realizada a partir do modelo médio no espaço de estados para obtenção da função de transferência da planta para o controle em malha fechada.

O capítulo 4 demonstra as estratégias de controle do motor CC e do conversor *Boost* utilizados. O motor CC terá sua velocidade controlada de acordo com um perfil de vento e o conversor *Boost* irá controlar a corrente de entrada no seu indutor, extraindo a máxima potência fornecida pelo conjunto motor-gerador que emula um aerogerador. Em seguida, serão apresentados os critérios de projeto dos controladores atuantes nas malhas de controle tanto do motor CC como do conversor *Boost*, a partir de uma análise de estabilidade e de resposta transitória via diagramas de Bode e lugar geométrico das raízes.

O capítulo 5 expõe os principais resultados de simulação e experimentais obtidos para validação do sistema analisado. São apresentados os resultados do controle proposto para o motor CC, as formas de onda geradas nos terminais da máquina síncrona, a saída do retificador e os resultados obtidos pelo conversor CC-CC *Boost*.

No capítulo 6 serão exibidas as conclusões gerais. Para finalizar o documento, serão apresentadas as referências bibliográficas, o apêndice composto do código embarcado no microprocessador DSP (*Digital Signal Processor*) TMS320F28335, utilizado para o controle do sistema, bem como os principais obstáculos encontrados no desenvolvimento deste trabalho.

2. ESTADO DA ARTE

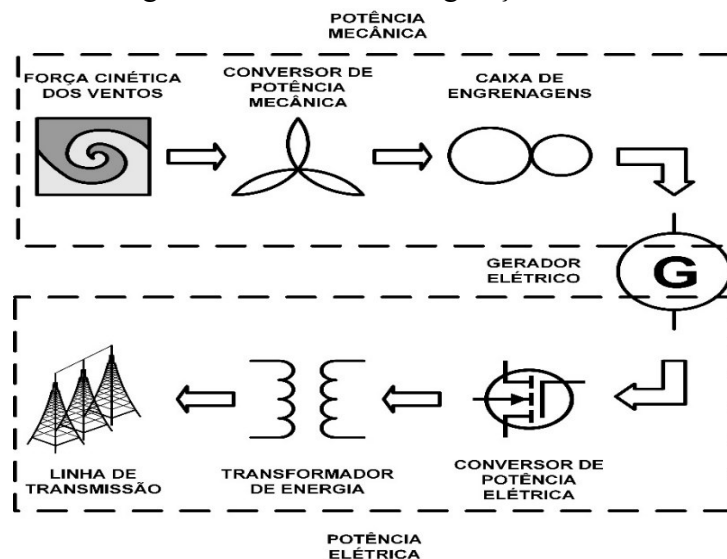
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta os principais tipos de geração de energia eólica, com ênfase nos tipos de geradores utilizados. Serão apresentadas as principais características dos modelos de aerogeradores, as técnicas de extração da máxima potência tradicionalmente utilizadas e suas vantagens no que tange a injeção de potência em um barramento CC.

2.2. TOPOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

A geração de energia elétrica através do vento é realizada a partir das chamadas turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores. Esses aerogeradores são compostos basicamente por pás, eixos de baixa e alta velocidade e o gerador de energia. As pás são responsáveis pela captação da energia cinética dos ventos. O eixo de baixa velocidade é ligado geralmente a uma caixa de engrenagens responsável por multiplicar a velocidade das pás e o eixo de alta velocidade é ligado ao gerador que é responsável pela geração de energia elétrica. Após a conexão de componentes mecânicos o sistema também passa por uma ligação elétrica, onde, se interliga retificadores, conversores cc-cc, inversores de frequência, filtros de conexão com a rede e o sistema elétrico. O sistema pode ser ilustrado de acordo com a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Sistema de geração eólica.



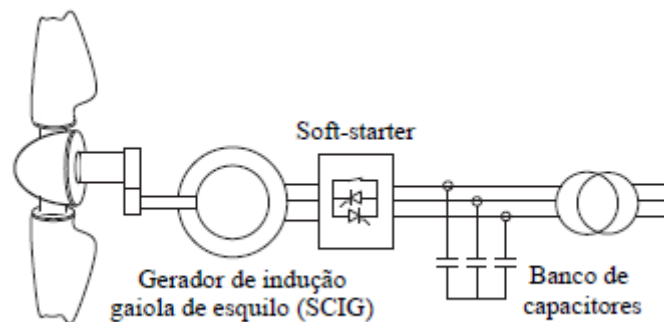
Fonte: Dados do próprio autor.

2.2.1. TIPOS DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

Os Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE) são divididos em dois tipos: turbinas de velocidade fixa e turbinas de velocidade variável. As turbinas de velocidade fixa possuem uma estrutura mais simples, com poucos recursos na otimização da extração de energia do vento. Já as turbinas de velocidade variável classificam-se em três topologias basicamente, diferenciando principalmente no modo como a eficiência aerodinâmica do rotor é definida para condições adversas de velocidade de vento, conforme evidenciado abaixo (TAVEIROS, 2014):

- **Turbinas de velocidade fixa:** são turbinas que utilizam em sua composição um gerador de indução gaiola de esquilo (*Squirrel Cage Induction Generator* - SCIG) que são ligados, através de um transformador, à rede de energia, como mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 – Turbina eólica com velocidade fixa.



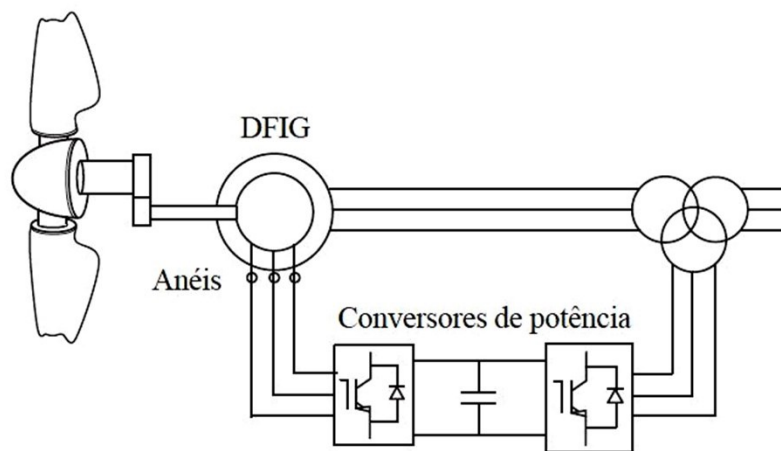
Fonte: (TAVEIROS, 2014).

As turbinas de velocidade fixa receberam esse nome por não existir um controle automático na velocidade de rotação da turbina, com isso o gerador funciona em velocidade quase constante vinculada a frequência da rede. Esses aerogeradores necessitam de dispositivos que compensem a energia reativa exigida na partida da máquina e materiais adicionais para o controle de operação, como por exemplo as *soft-starters* e algum dispositivo de proteção que evita a operação da máquina como motor durante os ventos de baixa intensidades. Por serem turbinas de baixa complexidade, possuem como maior benefício o baixo custo de implementação e manutenção. Em desvantagem, evidencia-se a baixa eficiência e a utilização de energia reativa, visto que não existe controle de potência ativa ou reativa no sistema. Outra característica dessas turbinas envolve a conversão de flutuações do

vento em flutuações mecânicas na qual são convertidas em flutuações elétricas (*flicker*). E essas acabam influenciando na qualidade da energia no ponto de acoplamento com a rede elétrica (TAVEIROS, 2014).

- **Turbinas de velocidade variável com conversor de potência parcial:** esse tipo de estrutura permite o controle de velocidade da turbina com o uso de um gerador de indução duplamente alimentado (*Doubly Fed Induction Generator* - DFIG). Os enrolamentos do rotor são interligados a um conversor *back-to-back* por anéis de escorregamento, como ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Turbina eólica com DFIG de velocidade variável.



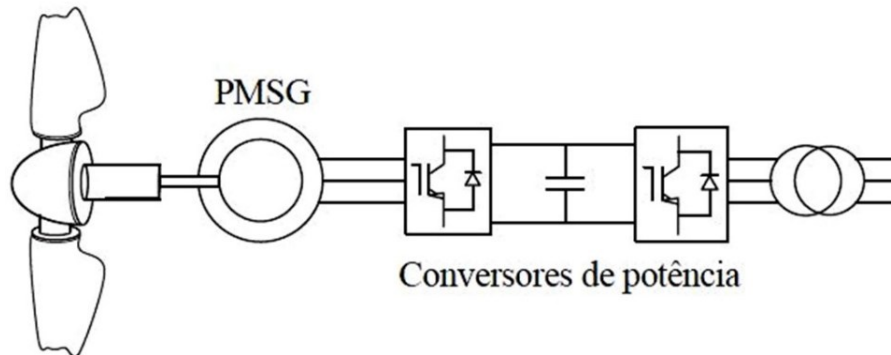
Fonte: (TAVEIROS, 2014).

O controle da frequência do rotor é realizado pelo conversor de potência, que controla de forma indireta a velocidade do rotor. Nesta estrutura a velocidade do DFIG se mantém próximo de 30% da sua velocidade síncrona. Como o rotor do DFIG consegue processar apenas a potência de escorregamento, a potência dos conversores é estipulada em 30% da potência nominal do sistema. Em turbinas de alta potência é observado, como ponto positivo, a estrutura dos conversores com caracterizações menores. Nessa configuração a compensação de potência reativa é alcançada no sistema. Por ter um controle definido e isolado em relação ao torque e a velocidade, assim como das potências ativa e reativa, os aerogeradores com utilização do DFIG se tornam de grande aplicabilidade (TAVEIROS, 2014).

- **Turbinas de velocidade variável com conversor de potência total:** esta estrutura utiliza um conversor de potência *back-to-back* e um gerador síncrono de ímã permanente (*Permanent Magnet Synchronous Generator* - PMSG). Ao

conversor, os enrolamentos do estator são conectados e através de um transformador ocorre à conexão com a rede, como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Turbina com PMSG de velocidade variável.



Fonte: (TAVEIROS, 2014).

Por se tratar de turbinas que aderem uma estrutura direta, o gerador é ligado ao rotor da turbina sem nenhuma conexão mecânica entre esses componentes. Como a conexão do aerogerador com a rede é feita em sequência, toda potência produzida pela máquina será entregue de maneira integral pelo conversor na mesma frequência da rede. Assim, toda variação de vento capaz de gerar energia elétrica é aproveitada (TAVEIROS, 2014).

A tabela 2.1 apresenta as vantagens e desvantagens dos principais tipos de turbinas mostradas.

De acordo com (TAVEIROS, 2014) grande parte dos laboratórios têm concentrado suas pesquisas no aperfeiçoamento dos SCEE's, impactando de modo direto nos gastos de implantação e na sua capacidade. O desenvolvimento da geração eólica é alcançado quando os limites do sistema são investigados e examinados continuamente. Os parâmetros existentes desses sistemas ainda exigem referências mais fundamentadas em alguns tópicos da tecnologia. Por se tratarem de grandes estruturas, analisar os aerogeradores em funcionamento se torna difícil, sendo assim, adequado emular suas particularidades e seu desempenho em laboratório.

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens das turbinas de velocidade fixa e variável.

Topologias do SCEE	Vantagens	Desvantagens
Turbinas de velocidade Fixa	<ul style="list-style-type: none">• Baixo custo.	<ul style="list-style-type: none">• Baixa eficiência;• Consumo de energia reativa;• Flutuações do vento em flutuações mecânicas e consequentemente em flutuações elétricas (<i>flicker</i>).
Turbinas de velocidade variável com conversor de potência parcial (DFIG)	<ul style="list-style-type: none">• Capacidade de desacoplamento entre o controle das potências ativa e reativa;• Baixo custo comparado ao PMSG;• Potência do conversor especificada em 30% da potência nominal.	<ul style="list-style-type: none">• Necessita de anéis coletores e caixa de engrenagens;• Faixa de velocidade limitada.
Turbinas de velocidade variável com conversor de potência total (PMSG)	<ul style="list-style-type: none">• Alcança a máxima faixa de variação de velocidade;• Não necessita de caixa de engrenagens;• Não precisa de anéis de deslizamentos e escovas;• Permite o controle desacoplado das potências ativa e reativa.	<ul style="list-style-type: none">• Alto custo;• Perdas elevadas;• Aumento de conteúdo harmônico;• Gerador volumoso;• Problemas de desmagnetização dos ímãs em altas temperaturas.

Fonte: Dados do próprio autor.

A instalação de um aerogerador, mesmo de pequeno porte no campus da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), não é uma escolha viável que justifique o investimento devido à pouca ocorrência de ventos com potência suficiente. Diante deste cenário, foi montado um emulador do aerogerador em escala laboratorial que possibilitou o melhor entendimento dos fenômenos na geração eólica de energia. Dentre os principais tipos foi escolhido o sistema de turbina de velocidade variável com conversor de potência total. Esse tipo de estrutura possibilitou a montagem do emulador com controle nas partes mecânicas do sistema e no processamento de potência gerada nos componentes eletrônicos da sua estrutura.

2.3. RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)

Como o sistema de geração de energia eólica possui um comportamento linear da tensão e corrente na saída do gerador utilizado, o uso de técnicas de MPPT se tornou essencial.

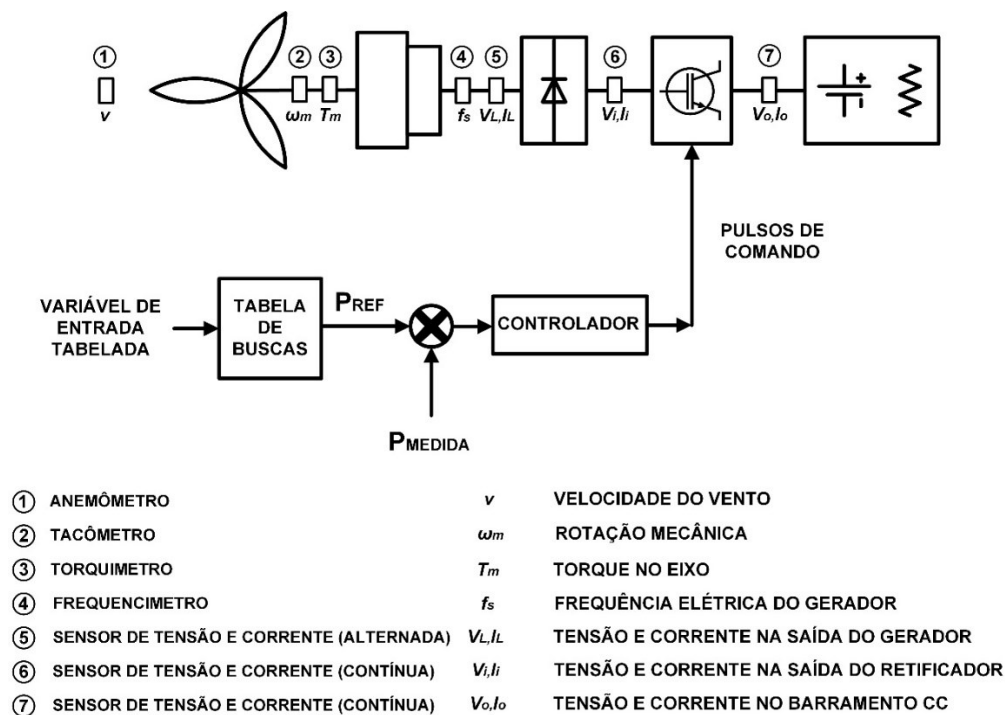
A utilização de uma turbina de velocidade variável em condições de vento inferior a nominal é realizada a partir do controle da aceleração do gerador. Na intenção de potencializar o aproveitamento da energia eólica em diversas intensidades, deve-se realizar o controle da turbina de modo que a velocidade na ponta da pá permaneça em seu valor ótimo (TAVEIROS, 2014).

2.3.1. TÉCNICAS DE MPPT PARA O SISTEMA EÓLICO

As técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (termo do inglês: *Maximum Power Point Tracker* – MPPT) estão em aprimoramento contínuo, sendo que a técnica mais conhecida é fundamentada no princípio da “tabela de buscas”. Esse método funciona da seguinte maneira: em lugares específicos, sejam mecânicos ou elétricos realiza-se uma leitura das variáveis do sistema, tais como, velocidade de rotação, torque no eixo, velocidade do vento, frequência elétrica, tensão ou corrente em algum lugar do gerador. Conhecendo essas variáveis, constrói-se uma tabela “programada” na qual é possível saber a potência máxima acessível. Analisando essa potência pré-definida com a que está sendo drenada do sistema, torna possível mudar o estado de trabalho do conversor e assim alcançar a máxima potência (TIBOLA, 2009).

A Figura 2.5 apresenta um diagrama esquemático que exemplifica o conjunto eólico com rastreamento de máxima potência, utilizando “tabela de buscas”, onde observa-se várias formas de fazer aquisições de potência, tanto para identificar a máxima disponível, quanto para observar a potência drenada e, assim, agir de modo conveniente no controle para extrair a máxima potência.

Figura 2.5 – Diagrama de um sistema de MPPT com tabela de buscas.



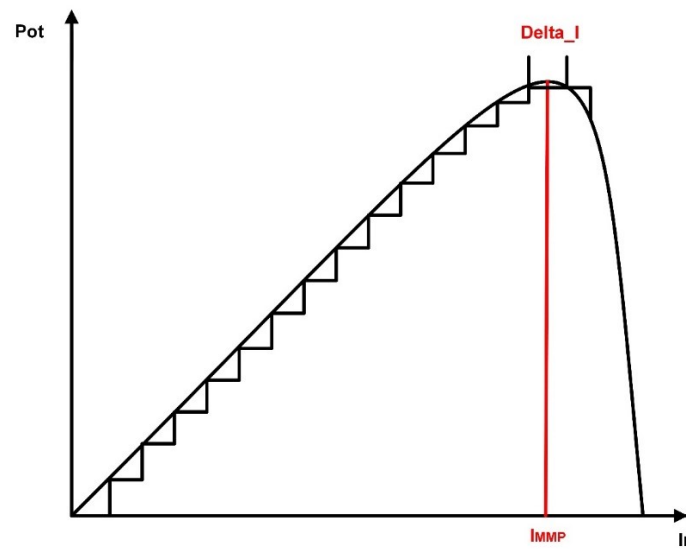
Fonte: Dados do próprio autor.

O diagrama da Figura 2.5 mostra os principais pontos onde os sensores podem ser instalados para mensurar as grandezas pertencentes a “tabela de buscas”. Os sensores informam grandezas mecânicas e elétricas. As grandezas mecânicas são: a velocidade do vento, a velocidade angular no eixo do gerador e seu torque. As grandezas elétricas englobam a frequência da tensão na saída do gerador, os valores das tensões e correntes alternadas geradas, o valor da tensão e corrente contínua na saída do retificador e a tensão e corrente na saída do conversor CC.

Outro método utilizado na busca do ponto de máxima potência e utilizado no sistema deste trabalho é comumente detectado nos sistemas fotovoltaicos. O mesmo consiste no ato de “perturbar e observar” no qual o ponto de operação do conversor é alterado e verificado o processamento de energia disponível. Feito esta análise, a potência disponível é examinada para os dois pontos de operação, caso a potência do novo ponto

seja maior que a do primeiro, o sistema passa a atuar nessa nova região, esse processo é repetido até que a variação de potência do sistema seja igual a zero e assim alcançando seu ponto de máxima potência. Esse método recebe esse nome por funcionar com “perturbações” na razão cíclica do conversor e “observar” o que essas alterações provocam na drenagem de energia do sistema (TIBOLA, 2009). A Figura 2.6 ilustra esse método.

Figura 2.6 – Gráfico generalizando o princípio de rastreamento de máxima potência.



Fonte: Dados do próprio autor.

A Figura 2.6 demonstra as pequenas variações de correntes representadas por “Delta_I” responsáveis pelas “perturbações” no sistema que afetarão o aumento ou decréscimo de energia representado pela potência “Pot” para um determinado valor de corrente.

Outro método comum para a extração de máxima potência nos sistemas eólicos é o controle do *tip speed ratio* (TSR (λ)). O TSR é a associação entre velocidade tangencial na ponta de uma pá em um aerogerador e a velocidade efetiva do vento. A velocidade na ponta das pás pode ser calculada a partir da relação entre a velocidade de rotação do motor (ω), o raio do motor (R) e a velocidade do vento (v) como é mostrado em 2.1 (TIBOLA, 2009).

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2.1)$$

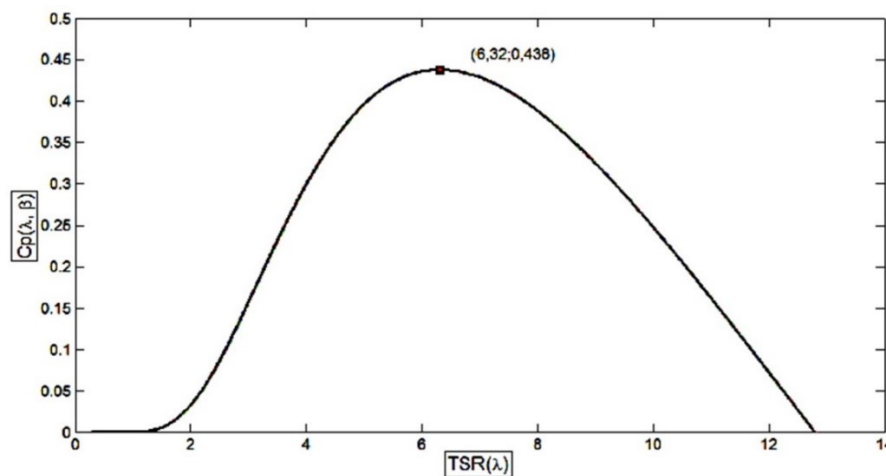
A grandeza que relaciona a fração da potência do vento extraída por uma turbina eólica é denominada coeficiente de potência (C_p). A conversão de energia é diretamente proporcional ao coeficiente de potência, pois, quão grande for o coeficiente de potência maior se torna a transformação de energia. O coeficiente de potência é um modelo específico das turbinas representado em 2.2 (FRANCISCO, 2012).

$$C_p = \frac{\omega T}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (2.2)$$

Onde ρ representa a densidade do ar dada em (Kg/m^3); A é a seção plana transversal dada em (m^2) e v a velocidade do vento especificado em (m/s).

Analisando o coeficiente de potência e o TSR, nota-se que para diferentes velocidades de vento e diversas velocidades de rotação da máquina, percebe-se que o sistema possui características de um ponto de máxima potência (FRANCISCO, 2012). A Figura 2.7 mostra essas características.

Figura 2.7 – C_p em relação ao TSR para diversas velocidade de vento e de rotação da turbina.



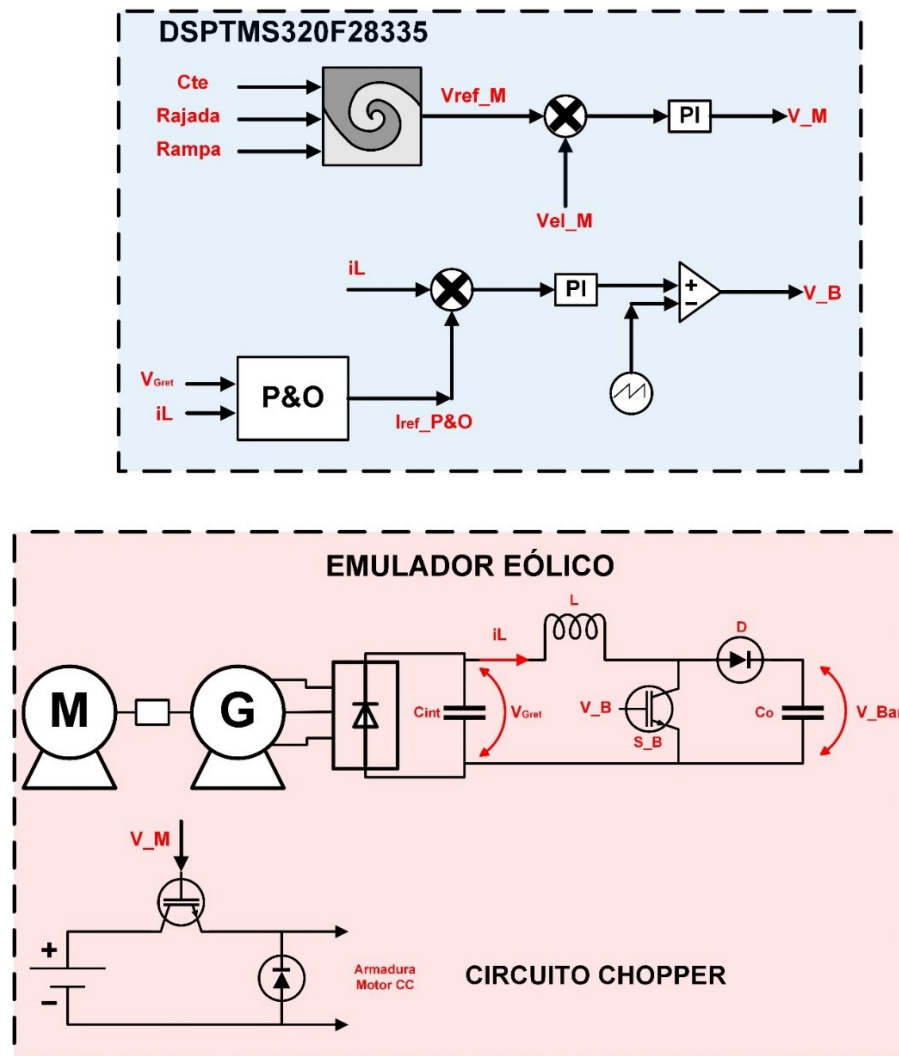
Fonte: (FRANCISCO, 2012).

Segundo (FRANCISCO, 2012) o controle dos aerogeradores pelo TSR é realizado a partir do TSR ótimo, que significa um exclusivo valor de referência de cada máquina. Com o TSR se conservando ótimo, seja qual for a velocidade de vento disponível é possível se obter o ponto de máxima potência (termo em inglês: *Maximum Power Point* – MPP) eólico. As modificações na área da turbina e as oscilações da densidade do ar no decorrer do tempo se tornam fatores inconvenientes para o cálculo e utilização do TSR ótimo teórico.

2.4. ESTRUTURA PROPOSTA NO TRABALHO

Para fins de comprovação e validação da eficácia da estratégia de emular um aerogerador de velocidade variável com conversor de potência total com extração de máxima potência, um tipo dessa estrutura foi projetado e implementado experimentalmente. O diagrama esquemático que representa a referida estrutura é apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Estrutura do sistema eólico constituído por um motor CC conectado a uma máquina síncrona com seu sistema de controle.



Fonte: Dados do próprio autor.

As principais características da força dos ventos foram emuladas a partir de um algoritmo criado para este fim, fornecendo sinais de velocidade para o controle do motor CC. Esses sinais de velocidade fizeram o motor representar de forma satisfatória o comportamento do rotor de um aerogerador em condições de operação na incidência de vento.

O motor utilizado para emular o comportamento do vento em diferentes condições foi um motor CC da Lavil com potência de 1 CV. O gerador de energia utilizado foi uma máquina síncrona também da Lavil com potência de saída de 1 kW. Durante os testes realizados, a máquina síncrona foi utilizada com a configuração semelhante de uma máquina de imã permanente, alimentando seu campo com uma fonte CC com um valor fixo.

O processo de análise da energia gerada pelo sistema mecânico foi analisado a partir de um retificador trifásico tradicional, passando por um conversor CC – CC e injetado em um barramento de corrente contínua. A extração de máxima potência disponível no sistema foi feita pelo conversor CC – CC do tipo *Boost*. A técnica de MPPT utilizada foi a P&O clássica associada a um algoritmo de controle desenvolvido especificamente para detecção de um ponto global de máxima potência.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados os três principais tipos de geração de energia eólica existentes. Com relação as topologias apresentadas, foi implementada a topologia da turbina de velocidade variável com conversor de potência total ao qual se tinha acesso a partir dos materiais dispostos no laboratório. Mesmo com um nível de complexidade maior e um preço mais elevado por causa do processamento total de potência do sistema, a falta de um conjunto de máquinas que dispusesse de uma outra configuração limitou a pesquisa.

Em relação a busca de máxima potência desejada em um sistema eólico, percebeu-se que para cada velocidade do gerador existe um ponto máximo de potência, representando seu ponto ótimo de operação. Para que essa máxima potência fosse extraída foi utilizado a técnica de P&O, pois, independente das variações provocadas na geração, o sistema conseguiria alcançar seu ponto ótimo.

Diante disso, destaca-se como contribuição da pesquisa proposta a implementação de uma estrutura de uma turbina com velocidade variável capaz de emular as principais características dos ventos e operar no ponto de máxima extração de potência. Tal estrutura possibilitará o estudo de fenômenos da geração eólica em uma escala laboratorial, com possibilidade de aprimoramento de diversas técnicas de controle.

3. ESPECIFICAÇÕES, MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES DO SISTEMA

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados a modelagem matemática e o dimensionamento de cada elemento constituinte do sistema que inclui: motor CC, máquina síncrona, retificador e conversor CC-CC Boost. O conversor será aplicado no sistema que terá as características de um sistema eólico, emulado pelo conjunto motor gerador, para fins de extração de máxima potência disponível na sua geração.

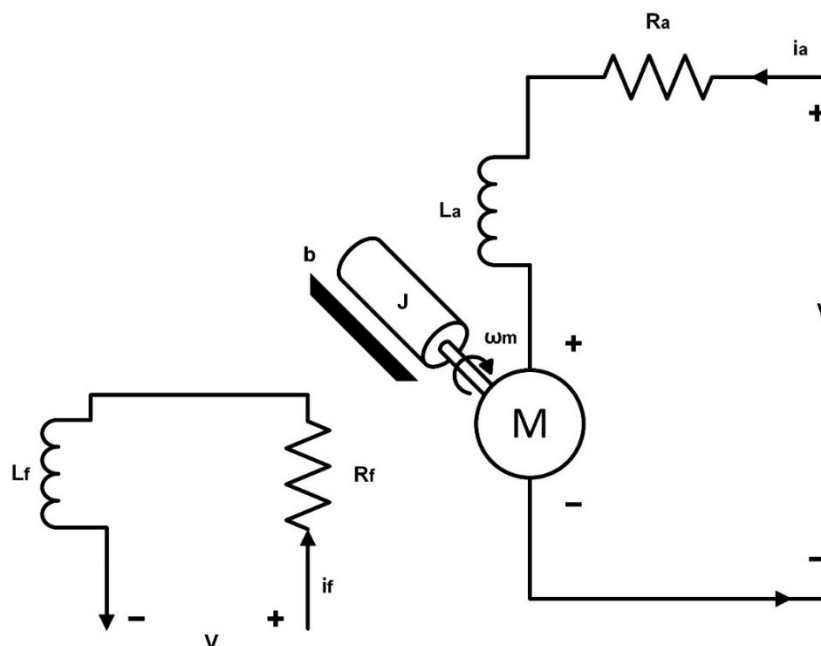
O comportamento estático e/ou dinâmico de um sistema é determinado a partir da modelagem matemática do mesmo, representando-o por uma função de transferência. Essa modelagem será realizada tanto para o motor CC quanto para o conversor Boost utilizando o modelo médio no espaço de estados. A máquina síncrona não foi modelada tendo em vista que foi adotada uma tensão fixa na alimentação de seu campo deixando a máquina ser influenciada apenas pela velocidade imposta no seu eixo mecânico.

3.2. DETERMINAÇÕES DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Em se tratando da exatidão do controle e simplicidade no ajuste de velocidade para diversas situações, os motores CC são muito empregados no ambiente industrial (MAIRINCK, 2014). Como será necessário um controle preciso de velocidade para que o motor emule de maneira desejável os principais fenômenos que constituem o vento, o motor CC foi escolhido para a tarefa.

Alguns parâmetros básicos de um motor CC são apresentados na Figura 3.1 que serão discutidos para obtenção do modelo utilizado no presente trabalho.

Figura 3.1 – Topologia básica de um motor CC.



Fonte: Dados do próprio autor.

A estrutura apresentada na Figura 3.1 demonstra um motor de corrente contínua de excitação independente com uma carga mecânica relacionada. Nessa estrutura, a corrente de campo não sofre alterações, permanecendo em um valor estipulado. A inércia composta pelos elementos girantes, eixo, rotor do motor, carga e acoplamentos é caracterizada por J . O atrito viscoso, existente entre motor e carga, é determinada por b (N.m.s/rad). O torque da carga em contradição à dinâmica do sistema é chamado de T_L . O parâmetro R_a é a resistência do enrolamento da armadura, L_a é a indutância da armadura e ainda, ω_m é a velocidade angular do rotor simbolizada em radianos por segundo. A grandeza L_f é a reatância e R_f a resistência das bobinas de campo (PATENÉ, 2008).

Segundo (MAIRINCK, 2014) três técnicas são comumente encontradas na literatura para o controle da velocidade nos motores CC, são elas: variação da resistência de armadura, variação da tensão de armadura e enfraquecimento da corrente de campo. O primeiro recurso mencionado compõe-se por um reostato R em série com a resistência do rotor R_a (armadura), de modo a ampliar sua resistência. Com isso a redução da tensão se torna proporcional a baixa de velocidade $((R_a + R) * I_a)$. A segunda técnica compreende em variar a tensão da armadura (v) da máquina até seu valor nominal, visto que, o aumento ou decréscimo da tensão influencia de maneira proporcional na

velocidade do motor. Já a terceira técnica baseia-se em controlar o fluxo (i_f) do campo da máquina CC.

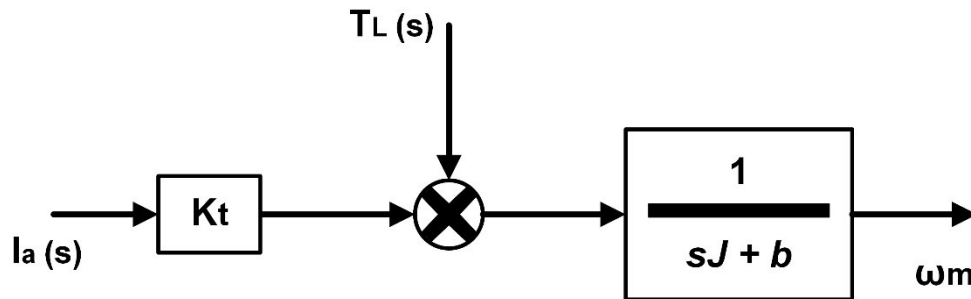
Escolheu-se para controlar a velocidade do motor do presente trabalho a técnica de variação da tensão na armadura, por se tratar de uma grandeza mais robusta, simples implementação e mais eficaz. Diante disso, foi estudado a implementação do motor CC em forma de diagrama de blocos e posteriormente em uma função de transferência no intuito de elaborar seu controle.

A dedução matemática do funcionamento básico do motor CC é demonstrada em (PATENÉ, 2008). Seguindo sua exposição, em (3.1) informa como a velocidade do motor responde em função da corrente de armadura I_a .

$$\frac{w_m(s)}{I_a(s) * k_i - T_L(s)} = \frac{1}{s * J + b} \quad (3.1)$$

Para melhor entendimento de (3.1) seu modelo é apresentado em forma de diagrama de blocos como mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Diagrama de blocos relacionando velocidade e corrente na armadura.



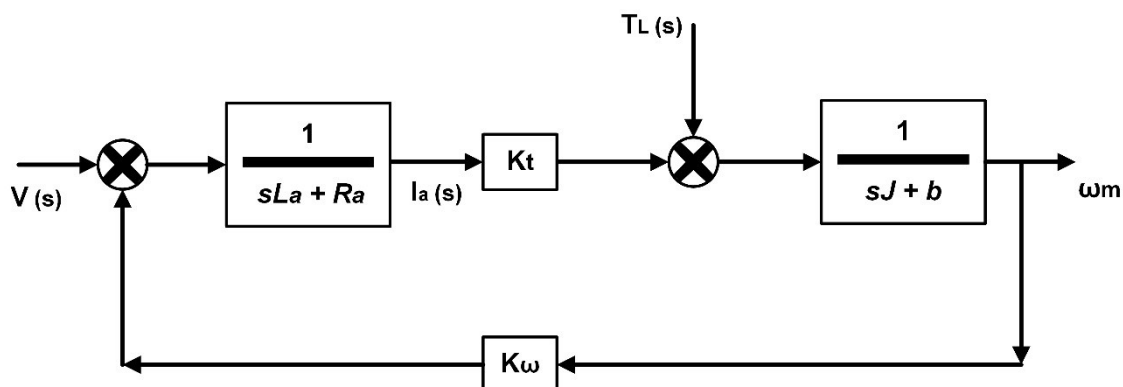
Fonte: Dados do próprio autor.

O intuito é relacionar a velocidade angular do eixo do motor com a tensão imposta na armadura do mesmo. Nesse sentido, seguindo o mesmo raciocínio efetuado para a corrente em relação a velocidade, praticado em (PATENÉ, 2008), a tensão na armadura pode ser relacionada com a velocidade angular, considerando uma carga no motor nula ($T_L(s) = 0$), como apresentado em (3.2).

$$G_M(s) = \frac{w_m(s)}{V(s)} = \frac{\frac{k_t}{J * L_a}}{s^2 + \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{b}{J}\right)s + \left(\frac{R_a * b}{J * L_a} + \frac{k_t * k_w}{J * L_a}\right)} \quad (3.2)$$

A função de transferência apresentada em (3.2) é demonstrada em forma de diagrama de blocos na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Diagrama de blocos do motor CC com entrada de tensão e saída como velocidade.



Fonte: Dados do próprio autor.

3.2.1. ESPECIFICAÇÕES DOS PARÂMETROS DO MOTOR CC UTILIZADO

Como visto na Figura 3.3, alguns parâmetros construtivos do motor CC são necessários para sua modelagem. As principais especificações são: a indutância da armadura L_a , a resistência da armadura R_a , o momento de inércia J , o atrito viscoso b e as constantes construtivas do motor, constante de torque elétrico k_t e constante da força eletromotriz k_w . Esses parâmetros foram calculados a partir de ensaios feitos na máquina CC em laboratório.

Os testes foram feitos pré-estabelecendo a velocidade de rotação do motor em torno de 10% do seu valor nominal 1800 rpm. Estabilizou-se a velocidade do motor em 189,75 rpm, cerca de 10,5% do valor nominal, próximo ao valor desejado. Ao atingir essa velocidade foi realizada a leitura dos valores e obteve-se: 0,88 A de corrente na armadura I_a , $2,7\Omega$ das perdas resistivas nos enrolamentos da armadura ($R_a + R_e$), na qual R_e é a resistência dos cabos utilizados, e 230,4W de potência elétrica P_{el} injetada no motor. Com esses valores foi calculado a potência mecânica gerada pela máquina através de (3.3).

$$P_{mec} = P_{el} - (R_a + R_e) * I_a^2 \quad (3.3)$$



$$P_{mec} = 230,4 - (2,7) * 0,88^2 \quad (3.4)$$

$$P_{mec} = 228,3 \text{ W} \quad (3.5)$$

Com o valor da potência mecânica do motor foi possível calcular o atrito viscoso a partir em (3.6).

$$b = \frac{P_{el}}{w_m^2} \quad (3.6)$$

$$b = \frac{228,3}{189,75^2} \quad (3.7)$$

$$b = 6,34 * 10^{-3} \quad (3.8)$$

As constantes construtivas do motor k_t e k_w correspondem ao mesmo valor pelo fato da potência mecânica desenvolvida no eixo do motor ser igual à potência elétrica associada à força eletromotriz como é representado em (3.9) à (3.12).

$$P_{mec} = P_{ele} \quad (3.9)$$

$$T_m * w_m = E * I_a \quad (3.10)$$

$$(K_t * I_a) * w_m = (k_w * w_m) * I_a \quad (3.11)$$

$$K_t = k_w \quad (3.12)$$

As constantes k_t e k_w foram adquiridas de acordo com (3.13).

$$K_t = k_w = \frac{T_m}{I_a} \quad (3.13)$$

O conjugado mecânico T_m do sistema é calculado de acordo com (3.14).

$$T_m = \frac{P_{mec}}{w_m} \quad (3.14)$$

$$T_m = \frac{228,3}{189,75} \quad (3.15)$$

$$T_m = 1,203 \quad (3.16)$$

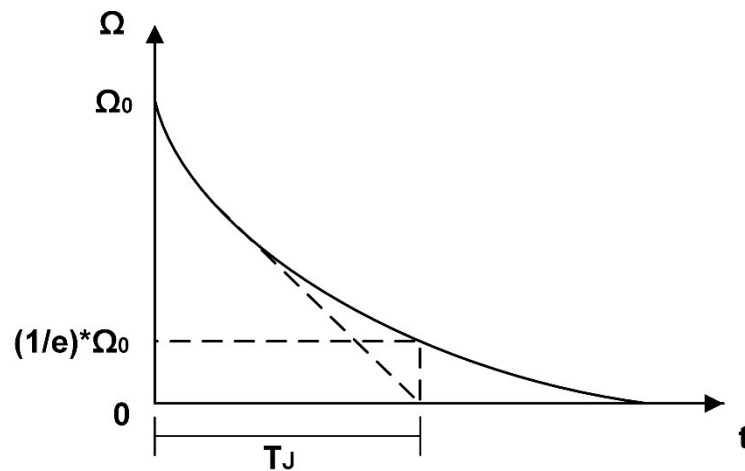
Desta forma, (3.13) se torna:

$$K_t = k_w = \frac{1,203}{0,88} \quad (3.17)$$

$$K_t = k_w = 1,367 \quad (3.18)$$

Outro parâmetro a ser calculado foi o momento de inércia J do motor. Para se calcular esse parâmetro foi estabelecido a velocidade de 1815 rpm em seu eixo. Feito isso, foi necessário fazer uma projeção de acordo com a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Curva de desaceleração do conjunto motor gerador.



Fonte: (SILVA, 2015).

A Figura 3.4 determina que ao estabelecer a velocidade nominal do motor, o mesmo seja desligado e mensurado o tempo de desaceleração até uma velocidade de 36,78% ($1/e$) da sua velocidade inicial. Medido esse tempo e com o valor do atrito viscoso calcula-se, de acordo com (3.19), o momento de inércia do motor. A velocidade de desaceleração chegou a 667,7 rpm e foi mensurado o tempo T_j de 1,6s.

$$T_j = \frac{J}{b} \quad (3.19)$$

$$J = b * T_j \quad (3.20)$$

$$J = 0,010144 \text{ Kg} * m^2 \quad (3.21)$$

A resistência e a indutância de armadura foram calculadas a partir da aplicação de uma tensão alternada de baixa amplitude no circuito de armadura, obtendo assim uma variação linear entre a tensão e corrente, conseguindo encontrar o módulo da impedância Z . Foi inserido uma tensão de 89,9 volts com uma angulação de 0° , mensurada uma

corrente de 2,6A com angulação de $-69,2^\circ$, uma potência ativa de 50W. A partir desses dados foi calculado a impedância do sistema de armadura como mostra (3.22).

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}_a}{\dot{I}_a} \quad (3.22)$$

$$\dot{Z} = \frac{89,9|0^\circ}{2,6|-69,147^\circ} \quad (3.23)$$

$$\dot{Z} = 34,57|69,147^\circ \quad (3.24)$$

$$\dot{Z} = 12,3 + j32,3 \quad (3.25)$$

Analisando (3.25) e a anotação de números imaginários tem-se:

$$R_a = 12,3\Omega \quad (3.26)$$

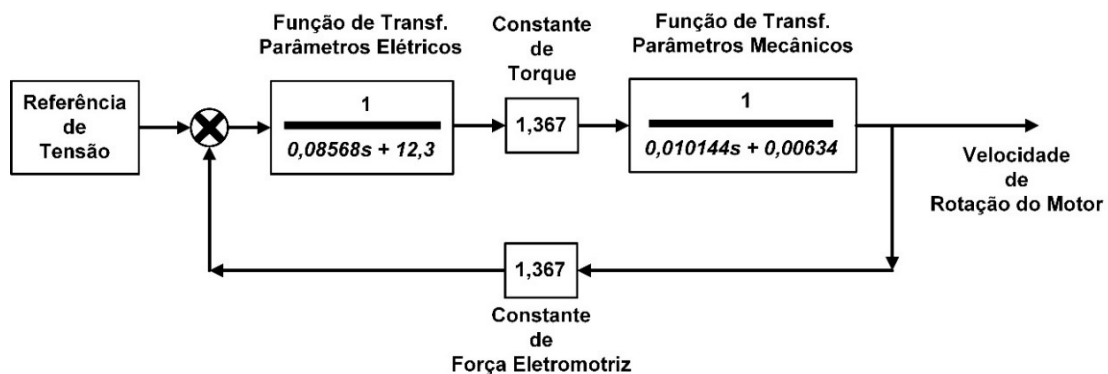
$$L_a = \frac{X_a}{2 * \pi * 60} \quad (3.27)$$

$$L_a = \frac{32,3}{2 * \pi * 60} \quad (3.28)$$

$$L_a = 85,68mH \quad (3.29)$$

Analisando os parâmetros encontrados e comparando com a Figura 3.3 foi possível montar um diagrama de blocos que representasse o comportamento do sistema. A Figura 3.5 apresenta esse diagrama de blocos do motor CC.

Figura 3.5 – Diagrama de blocos do motor CC sem controle.



Fonte: Dados do próprio autor.

A partir do diagrama de blocos, da Figura 3.5, foi possível encontrar a função de transferência do sistema representada por $G_M(s)$, que está especificada em (3.30).

$$G_M(s) = \frac{1572,82}{s^2 + (144,18)s + (2239,77)} \quad (3.30)$$

Os dados de placa do motor CC utilizado são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Especificações do motor CC utilizado.

Especificações	Valores
Potência	1,25 CV (919,4 W)
Velocidade	1880 Rotações por minuto (RPM)
Tensão	180VA / 180VC
Corrente	6 A

Fonte: (LAVILL, 2017).

3.3. EXPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA

Como a máquina síncrona não foi controlada diretamente no sistema, não foi estruturado nenhuma função de transferência que representasse seu comportamento. Seu funcionamento não foi controlado porque foi desejado que ela pudesse trabalhar de forma livre na geração das tensões senoidais.

Desta forma, apenas os dados de placa da máquina síncrona foram necessários para o funcionamento da mesma no sistema. A Tabela 3.2 apresenta essas informações.

Tabela 3.2 – Especificações do gerador trifásico utilizado

Especificações	Valores
Potência	1 KW
Velocidade	1800 (RPM)
Tensão	220/760V D/Y
Fases	3
Corrente	4.1 A
Frequência	60 Hz

Fonte: (LAVILL, 2017).

3.4. ESPECIFICAÇÕES DO RETIFICADOR TRIFÁSICO UTILIZADO

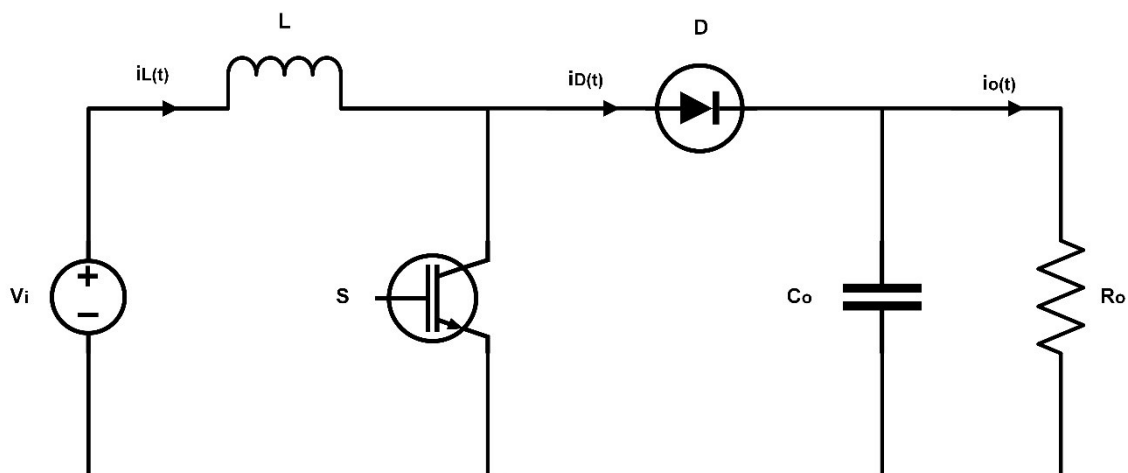
Conforme mencionado, o retificador trifásico utilizado foi um elemento composto por uma estrutura simples, construída a partir da utilização de diodos com características que suportassem os limites operacionais do sistema.

3.5. DETERMINAÇÕES DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR CC-CC BOOST

O conversor Boost é um conversor CC-CC largamente utilizado para se obter uma tensão média de saída para um nível superior ao de entrada. A tensão de entrada V_i está em série com um indutor L que trabalha como uma fonte de corrente. O interruptor S fornece a energia da fonte e do indutor, em uma operação de liga/desliga repetidamente, no intuito de aumentar a tensão de saída V_o .

O esquemático do conversor *Boost* é ilustrado na Figura 3.6. Quando o interruptor S é acionado, a fonte de entrada fornece energia ao indutor e, o diodo fica reversamente polarizado ($V_o > V_i$). Quando o interruptor é desligado a energia acumulada no indutor é fornecida ao capacitor C_o e à carga R_o . Os modos de operação do conversor são: modo de condução contínua (MCC), onde, a corrente $i_L(t)$ flui de maneira contínua pelo indutor, e o modo de condução descontínua (MCB), ou seja, a corrente se anula em uma parte do período.

Figura 3.6 – Conversor clássico CC-CC *Boost*.



Fonte: Dados do próprio autor.

Na aplicação desse conversor em um sistema eólico, a fonte de tensão de entrada será a tensão de saída de um retificador não controlado e terá amplitude variável, sendo essa controlada para a extração de máxima potência do conjunto motor-gerador. No caso da tensão de saída passa a ser controlada pelo inversor trifásico conectado em série.

A avaliação dos componentes do conversor *Boost*, considerando o MCC, foi elaborado da mesma forma que em (VILELA, 2011).

Os componentes foram determinados de acordo com a necessidade de o conversor atuar no MCC. Os parâmetros iniciais do conversor foram especificados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros do projeto do conversor *Boost*

Parâmetros	Valores
Valor máx. de tensão de entrada retificada (V_{iret})	330 V
Tensão de saída (V_o)	500 V
Potência de saída máx. (P_o)	1000 W
Frequência de chaveamento (F_s)	25 KHz
Resistência de saída para máx. potência (R_o)	250 Ω
Corrente máx. de entrada (I_{int})	4,1 A
Ondulação de corrente no indutor (ΔI_L)	$0,07 \cdot 4,1 = 0,287$ A
Ondulação de tensão de entrada (ΔV_{iret})	$0,01 \cdot 320 = 3,2$ V
Razão cíclica do conversor (D)	$\frac{V_o}{V_{iret}} = \frac{1}{1-D}$ $D = 0,36$

Fonte: Próprio autor.

O valor do indutor utilizado no projeto do conversor *Boost* está especificado em 3.31.

$$L = \frac{V_{iret} * D}{F_s * \Delta I_L} = 16,1 \text{ mH} \quad (3.31)$$

O projeto utiliza dois capacitores, onde, um utilizado em paralelo com a fonte de tensão retificada de entrada e outro é posicionado na saída do conversor disponibilizando um barramento de tensão contínua.

O capacitor de entrada do conversor C_{int} é usado para equilibrar a tensão nos terminais da ponte retificadora, de modo que essa não varie rapidamente devido a comutação da chave. Sendo assim, qualquer capacitor utilizado que não permita uma grande variação de tensão pode ser usado, atentando-se aos limites que o mesmo será submetido (RIBEIRO, 2011).

De acordo com (JÚNIOR, 2017), o dimensionamento do capacitor C_{int} foi realizado de acordo com 3.32.

$$C_{int} = \frac{P_o}{4 * \pi * f * V_{iret} * \Delta V_{iret}} \quad (3.32)$$

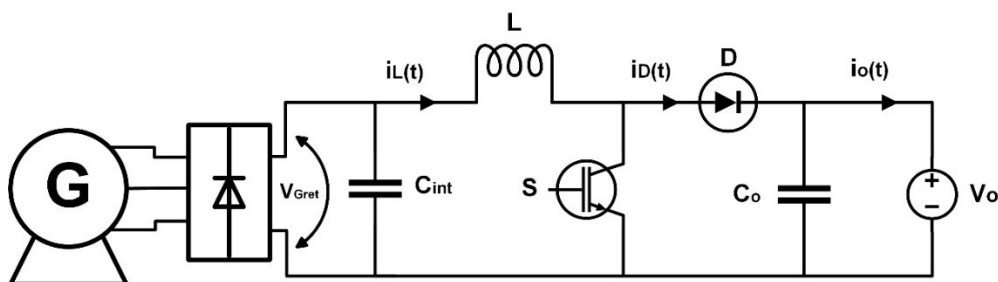
A frequência f da tensão nas extremidades do retificador corresponde ao dobro da frequência fundamental da rede de energia (120) Hz (JÚNIOR, 2017). Desta forma, o capacitor de entrada é $C_{int} = 1,3$ mF.

Os componentes utilizados no protótipo foram um indutor L de 7mH, o capacitor de entrada C_{int} foi montado um banco de 1,34mF com capacitores de 220μF em série, para aumento de tensão, e em paralelo, para aumento de sua capacitância. Para o capacitor C_o do barramento CC, esse já controlado por um inversor, também foi utilizado um banco de capacitores 220μF, totalizando uma capacitância de 440μF.

3.5.1. MODELAGEM DO CONVERSOR CC-CC BOOST

Tradicionalmente, o controle nos conversores CC-CC ocorre nas variáveis: corrente de entrada, tensão de saída ou ambos. Visto que a fonte de energia do sistema se dará a partir de uma máquina síncrona funcionando como gerador, o mesmo tem características de uma fonte de corrente. A corrente de entrada do conversor, ou corrente no indutor L , deve ser controlada para que ocorra a extração de máxima potência do sistema. Como o conversor *Boost* será conectado a um inversor, a tensão de saída do mesmo será regulada a partir desse inversor. Com isso, as variáveis controladas no sistema para o monitoramento da máxima potência foram a corrente $i_L(t)$ do indutor L e a tensão de entrada $V_{GRet}(t)$ nos terminais do capacitor C_{int} . Um esboço do conversor que será modelado é demonstrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Máquina síncrona em série com retificador e Conversor *Boost*.

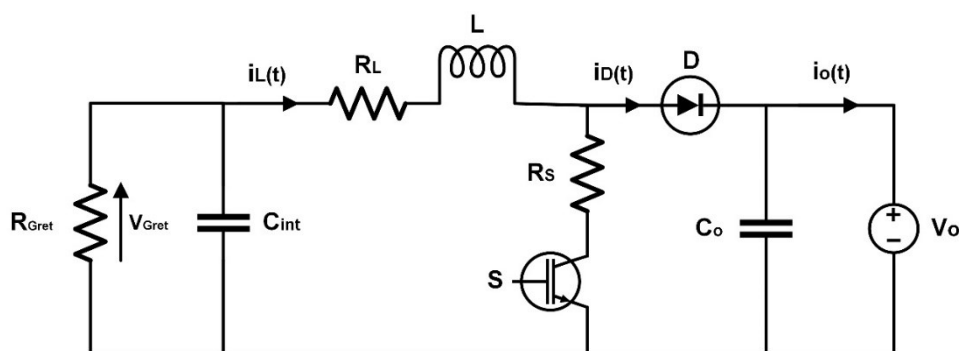


Fonte: Dados do próprio autor.

A modelagem do conversor *Boost* foi realizada analisando suas duas formas de funcionamento. De acordo com a Figura 3.7 seu funcionamento se baseia em duas maneiras: a primeira se dá quando o interruptor S está em condução e o diodo D está polarizado reversamente, e a segunda quando o diodo está conduzindo e o interruptor fica em corte, não permitindo passagem de corrente pelo seu ramo.

Como o conversor *Boost* modelado não terá características ideais em funcionamento, foram consideradas algumas fontes de perdas de energia. Essas perdas são causadas na condução do interruptor S , simbolizada por R_S , a perda no indutor L representada por R_L e a queda de tensão provocada pelo diodo D mostrada por V_D . As perdas causadas no capacitor foram desconsideradas na modelagem. O esquemático do conversor modelado é representado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Esquemático do conversor *Boost* modelado.



Fonte: Dados do próprio autor.

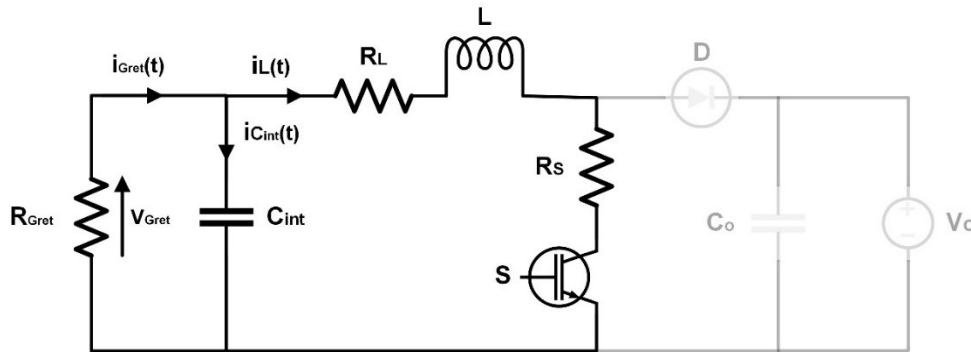
Conforme mencionado, a tensão de saída do conversor será controlada pelo inversor, e desta forma, para modelagem do conversor sua saída foi representada por uma fonte de tensão. Como a tensão de entrada pode sofrer algumas oscilações por causa do funcionamento do grupo motor-gerador, essa tensão foi indiretamente controlada pelo

controle da corrente i_L do indutor L , e desta forma, não permitindo mudanças bruscas na amplitude dessa tensão que pudesse danificar os componentes do circuito. Outro detalhe importante foi que a máquina síncrona juntamente com o retificador foram representados por meio de uma resistência R_{GRet} , que emulou o comportamento para a pior condição de funcionamento do sistema, sendo inserida em paralelo com o capacitor de entrada C_{int} .

A modelagem do conversor foi implementada a partir da passagem de corrente no interruptor S e o corte de condução no diodo D . Tal situação é demonstrada na Figura 3.9.

Os modelos físicos para os conversores CC se dão em relação aos elementos armazenadores de energia que se encontram em sua estrutura, no caso do *Boost* a modelagem será realizada em relação a corrente no indutor e a tensão do capacitor de saída ou de entrada. Como o conversor em questão será acoplado a um inversor e sua tensão de saída controlada pelo mesmo, a modelagem será feita em cima da corrente $i_L(t)$ do indutor L e a tensão V_{GRet} do capacitor C_{int} .

Figura 3.9 – Primeira etapa de atuação do conversor *Boost*.



Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 3.9, e aplicando a lei de Kirchhoff das tensões (LKT), tem-se:

$$V_{GRet} - R_L * i_L(t) - V_L - R_S * i_L(t) = 0 \quad (3.33)$$

$$V_L = V_{GRet} - R_L * i_L(t) - R_S * i_L(t) \quad (3.34)$$

$$L * \frac{di_L(t)}{dt} = V_{GRet} - R_L * i_L(t) - R_S * i_L(t) \quad (3.35)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{GRet}}{L} - \frac{R_L * i_L(t)}{L} - \frac{R_S * i_L(t)}{L} \quad (3.36)$$

Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes (LKI), tem-se:

$$i_{GRet} = i_L(t) + i_{Cint}(t) \quad (3.37)$$

$$i_{GRet} = i_L(t) + C_{int} * \frac{dV_{GRet}(t)}{d_t} \quad (3.38)$$

$$\frac{dV_{GRet}(t)}{d_t} = \frac{i_{GRet}(t)}{C_{int}} - \frac{i_L(t)}{C_{int}} \quad (3.39)$$

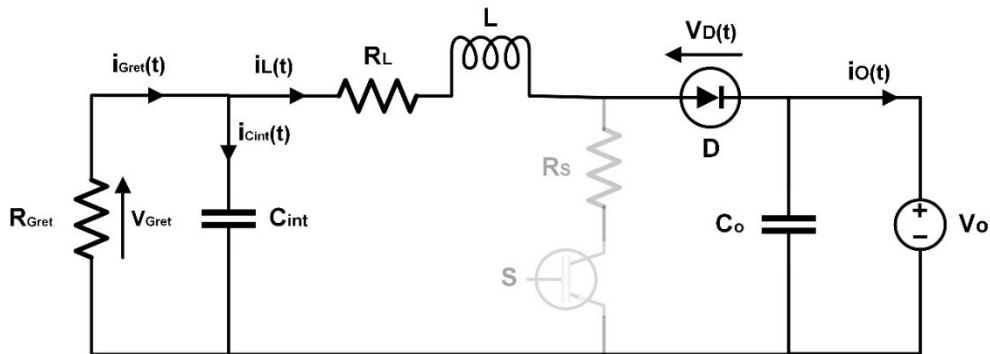
$$\frac{dV_{GRet}(t)}{d_t} = -\frac{V_{GRet}(t)}{R_{GRet} * C_{int}} - \frac{i_L(t)}{C_{int}} \quad (3.40)$$

Colocando (3.36) e (3.40) em forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{d_t} \\ \frac{dV_{GRet}(t)}{d_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L - R_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_{GRet}(t) \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Da mesma forma que foi realizada essa primeira modelagem, a segunda análise para quando o interruptor S está em corte e o diodo D está em condução também foi realizada. A Figura 3.10 demonstra como essa condição altera o sistema.

Figura 3.10 – Segunda etapa de atuação do conversor *Boost*.



Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 3.10 e aplicando a lei de Kirchhoff das tensões (LKT), a segunda etapa de operação fornece as seguintes equações:

$$V_{GRet} - R_L * i_L(t) - V_L - V_D - V_o = 0 \quad (3.42)$$

$$V_L = V_{GRet} - R_L * i_L(t) - V_D - V_o \quad (3.43)$$

$$L * \frac{di_L(t)}{dt} = V_{GRet} - R_L * i_L(t) - V_D - V_o \quad (3.44)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{GRet}}{L} - \frac{R_L * i_L(t)}{L} - \frac{V_D}{L} - \frac{V_o}{L} \quad (3.45)$$

Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes (LKI), tem-se:

$$i_{GRet} = i_L(t) + i_{cint}(t) \quad (3.46)$$

$$i_{GRet} = i_L(t) + C_{int} * \frac{dV_{GRet}(t)}{dt} \quad (3.47)$$

$$\frac{dV_{GRet}(t)}{dt} = \frac{i_{GRet}(t)}{C_{int}} - \frac{i_L(t)}{C_{int}} \quad (3.48)$$

$$\frac{dV_{GRet}(t)}{dt} = -\frac{V_{GRet}(t)}{R_{GRet} * C_{int}} - \frac{i_L(t)}{C_{int}} \quad (3.49)$$

Colocando (3.45) e (3.49) em forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dV_{GRet}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_{GRet}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_o \\ V_D \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Desta forma, com (3.41) e (3.50) é possível montar um estado de funcionamento para o sistema. Uma forma que se consegue avaliar e desenvolver controles para tal situação é a análise do sistema a partir das equações de espaço de estado.

A relação matricial que determina qualquer sistema físico com múltiplas entradas e saídas conforme um sistema invariante no tempo é representada em (3.51).

$$\frac{dx(t)}{dt} = A * x(t) + B * u(t) \quad (3.51)$$

Onde:

$x(t)$ – Vetor de estados;

$\frac{dx(t)}{dt}$ – Derivada do vetor de estados;

$u(t)$ – Vetor de entrada;

A – Matriz de sistema;

B – Matriz de entrada.

Como a modelagem do sistema foi realizada em cima da corrente $i_L(t)$ e da tensão $V_{GRet}(t)$ essas variáveis definem o vetor de estados do sistema. O vetor de entrada informa quais são as fontes independentes contidas no sistema, assim, no conversor em questão, as fontes V_o e V_D representaram esse vetor. Desta forma, os vetores de estados e de entrada são representados em (3.52) e (3.53) respectivamente.

$$x(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ V_{GRet}(t) \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} V_o(t) \\ V_D(t) \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Como para cada configuração do circuito existem dois conjuntos de matrizes, então a modelagem por variáveis de estados também apresentou dois conjuntos de matrizes de estado. Assim, para a condução no interruptor S foi denominado para a matriz de sistema e de entrada as variáveis A_1 e B_1 respectivamente. E quando o interruptor ficou em corte, as matrizes foram denominadas A_2 e B_2 . Essas matrizes são representadas em (3.54) e (3.55).

$$A1 = \begin{bmatrix} \frac{-R_L - R_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \quad B1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$A2 = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \quad B1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Considerando a operação em MCC do conversor e analisando um período de chaveamento é possível elaborar uma média das matrizes de sistema e de entrada onde são denominadas A_{med} e B_{med} respectivamente e são demonstradas a seguir.

$$A_{med} = A_1 * D + A_2 * (1 - D) \quad (3.56)$$

$$A_{med} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L - R_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} * D + \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} * (1 - D) \quad (3.57)$$

$$A_{med} = \begin{bmatrix} \frac{-DR_L - DR_S}{L} & \frac{D}{L} \\ -\frac{D}{C_{int}} & -\frac{D}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{-DR_L}{L} & \frac{D}{L} \\ -\frac{D}{C_{int}} & -\frac{D}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

$$A_{med} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L - DR_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$$B_{med} = B_1 * D + B_2 * (1 - D) \quad (3.60)$$

$$B_{med} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * D + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * (1 - D) \quad (3.61)$$

$$B_{med} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\frac{D}{L} & -\frac{D}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

$$B_{med} = \begin{bmatrix} \frac{D-1}{L} & \frac{D-1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

Encontrado as matrizes de sistema e de entrada médias, foi elaborado uma linearização do sistema de equações ao redor do ponto de operação desejado. No sistema estudado, será realizado a linearização do sistema em regime permanente. Como essa operação é praticada em regime permanente, a derivada da matriz de estados será nula. Assim as matrizes se tornam:

$$\frac{dx(t)}{dt} = A * x(t) + B * u(t) \quad (3.64)$$

$$0 = A_{med} * X + B_{med} * U \quad (3.65)$$

$$X = -A_{med}^{-1} * B_{med} * U \quad (3.66)$$

Substituindo (3.53), (3.59) e (3.63) em (3.66), tem-se:

$$X = - \begin{bmatrix} \frac{-R_L - DR_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{D-1}{L} & \frac{D-1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_o \\ V_D \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

$$X = \begin{bmatrix} \frac{(D-1) * (V_o + V_D)}{D * R_S + R_L * R_{GRet}} \\ \frac{R_{GRet} * (D-1) * (V_o + V_D)}{D * R_S + R_L + R_{GRet}} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Encontrado as variáveis de estado no ponto de operação, é necessário calcular o modelo para pequenos sinais, perturbando as variáveis de estado. Essa modelagem foi praticada de acordo em (JÚNIOR, 2017) que fornece (3.69).

$$\hat{X}(s) = (s * I - A_{med})^{-1} * B_{med} * \hat{U}(s) \quad (3.69)$$

$$\widehat{G}_{xu}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{U}(s)} = (s * I - A_{med})^{-1} * B_{med} \quad (3.70)$$

$$\widehat{G}_{xu}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{U}(s)} = \left\{ s * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{-R_L - D * R_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \right\}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{D-1}{L} & \frac{D-1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

$$\widehat{G}_{xu}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{U}(s)} = \begin{bmatrix} \frac{(L + C_{int} * L * R_{GRet} * s) * (D-1)}{L * [(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * D * R_S * R_{GRet} + C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (D * R_S + R_L + R_{GRet})]} \text{ igual a } a_{11} \\ \frac{R_{GRet} - D * R_{GRet}}{[(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * D * R_S * R_{GRet} + C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (D * R_S + R_L + R_{GRet})]} \text{ igual a } a_{21} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

Analisando (3.71), o item da primeira linha e primeira coluna informa a função de transferência da corrente no indutor em relação a tensão de saída ($\widehat{G}_{iL_{Vo}}(s)$). Já o item da segunda linha e primeira coluna determina a função de transferência da tensão de entrada em relação à tensão de saída ($\widehat{G}_{V_{GRet-Vo}}(s)$).

As funções de transferência das variáveis de estado associadas à razão cíclica foram determinadas assumindo a alteração na tensão de saída nula ($\hat{U}(s) = 0$) (JÚNIOR, 2017). Desta forma, tem-se:

$$\hat{X}(s) = (s * I - A_{med})^{-1} * B_d * \hat{D}(s) \quad (3.72)$$

$$\widehat{G}_{xd}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{D}(s)} = (s * I - A_{med})^{-1} * B_d = \begin{bmatrix} \widehat{G}_{iL_D}(s) \\ \widehat{G}_{V_{GRet}}(s) \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

$$\widehat{G}_{xd}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{D}(s)} = \left\{ s * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{-R_L - D * R_S}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_{int}} & -\frac{1}{R_{GRet} * C_{int}} \end{bmatrix} \right\}^{-1} * \begin{bmatrix} \frac{(V_o + V_D) * (R_S + R_L + R_{GRet})}{L * (D * R_S + R_L + R_{GRet})} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

$$\widehat{G}_{xd}(s) = \frac{\hat{X}(s)}{\hat{D}(s)} = \begin{bmatrix} \frac{(L + C_{int} * L * R_{GRet} * s) * (V_o + V_D) * (R_S + R_L + R_{GRet})}{L * [(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * D * R_S * R_{GRet} + C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (D * R_S + R_L + R_{GRet})] * (D * R_S + R_L + R_{GRet})} \\ \frac{R_{GRet} * (V_o + V_D) * (R_S + R_L + R_{GRet})}{[(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * D * R_S * R_{GRet} + C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (D * R_S + R_L + R_{GRet})] * (D * R_S + R_L + R_{GRet})} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

Na representação de (3.75) o item da primeira linha e primeira coluna, mostra a função de referência da corrente do indutor em relação a razão cíclica de chaveamento ($\hat{G}_{iL_D}(s)$). Já o elemento da segunda linha e segunda coluna, demonstra a função de transferência da tensão de entrada em relação a razão cíclica de chaveamento ($\hat{G}_{V_{GRet_D}}(s)$).

O grupo motor-gerador funciona como uma fonte de tensão, no qual sempre injeta tensões que são geradas pela máquina síncrona. Essa tensão necessita ser controlada para que não haja oscilações bruscas na entrada do conversor e prejudique seus componentes. O controle dessa tensão foi realizado de maneira indireta, controlando a corrente de entrada do conversor e assim possibilitando a extração máxima potência do sistema. Sendo assim, a função de transferência que permite controlar essa corrente é representada por $\hat{G}_{iL_D}(s)$. Fazendo uma simplificação na função de transferência desejada, representando com um valor nulo a resistência do interruptor (R_s) e a queda de tensão no diodo (V_D), a função se torna:

$$\hat{G}_{iL_D}(s) = \frac{\hat{G}_{iL_D}(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{(L + C_{int} * L * R_{GRet} * s) * V_o}{L * [(C_{int} * L * R_{GRet}) * s^2 + (C_{int} * R_L * R_{GRet} + L) * s + (R_L + R_{GRet})]} \quad (3.76)$$

3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados as especificações, os dimensionamentos e a modelagem matemática do motor CC, da máquina síncrona, do retificador e do conversor Boost. Dimensionou-se os componentes que compõe cada dispositivo e apresentou algumas considerações realizadas para tal tarefa. A modelagem matemática foi realizada utilizando o modelo médio no espaço de estados, onde, determinaram-se as funções de transferência para cada elemento constituinte do sistema.

O objetivo de controlar o motor se dá na função de conseguir uma velocidade angular específica, a partir de uma tensão aplicada em sua armadura. Para isso, obteve-se a função $G_M(s)$ que especifica essas características do motor CC. No intuito de controlar a corrente de entrada do conversor *Boost*, corrente no indutor L , utilizou a função $\hat{G}_{iL_D}(s)$ que informa a variação da corrente i_L para variações da razão cíclica D de operação.

As funções $G_M(s)$ e $\hat{G}_{iL_D}(s)$ são necessárias para realização do controle do motor e do conversor *Boost* em malha fechada. Esse controle será detalhado no capítulo 4.

4. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO SISTEMA

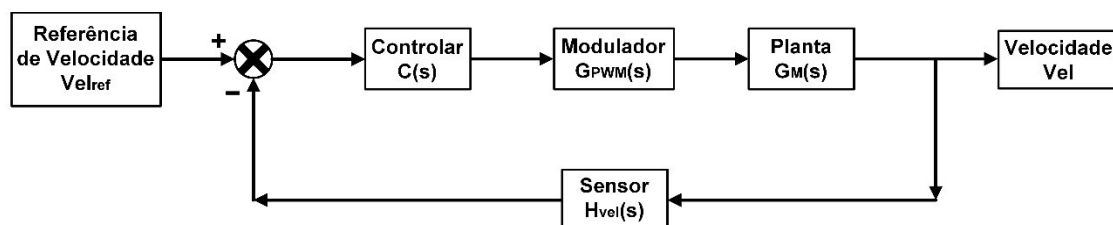
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão expostas as técnicas de controle utilizadas para controlar o motor de corrente CC e o conversor CC-CC Boost, utilizado para a extração de máxima potência do emulador eólico composto pelo grupo motor – gerador. O motor foi modelado e controlado para que respondesse, na sua velocidade, as características do vento impostas como referência. Já o conversor *Boost*, foi elaborado utilizando um algoritmo de MPPT, que permitiu extrair a máxima potência gerada controlando a corrente de entrada do conversor em diferentes condições de operações. Para implementação das estratégias de controle utilizou-se o microprocessador DSP modelo TMS320F28335 da Texas Instruments®, destacado pela sua alta performance no processamento de sinais digitais, possibilitando a modulação PWM (*Pulse With Modulate*) utilizado na técnica escolhida para o controle do motor CC e do conversor *Boost*.

4.2. COMPENSADOR DE VELOCIDADE NO MOTOR CC

A modelagem do motor CC foi realizada a partir de um controlador $C(s)$ em série com o modulador $G_{PWM}(s)$ e a planta $\hat{G}_M(s)$ com realimentação do sensor $H_{vel}(s)$, como é representado na Figura 4.1. A planta $\hat{G}_M(s)$ é a função de transferência do motor CC informada em (3.30). A planta de controle tem o objetivo de compensar o erro do valor de velocidade lido pelo sensor no sistema em relação a um valor de referência desejado e assim permitindo que o sistema responda da forma esperada.

Figura 4.1 – Diagrama de blocos que representa o controle do motor CC.



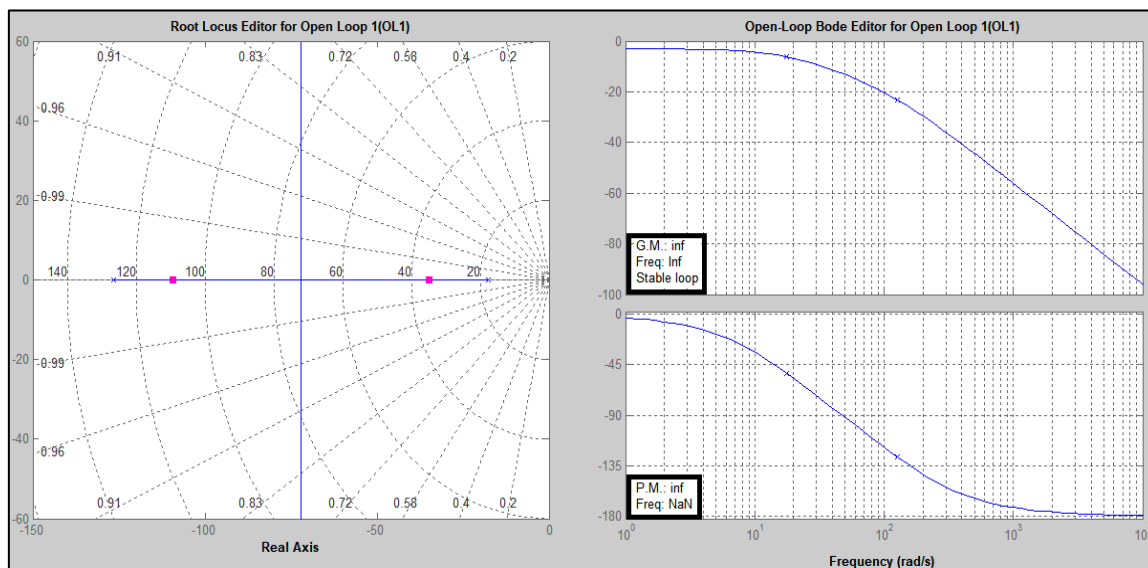
Fonte: Dados do próprio autor.

Examinando a Figura 4.1 foi projetado um compensador ($C(s)$) para o controle da velocidade angular do motor, no intuito do sistema responder a um sinal de referência desejado, que respeitasse suas características.

Para comprovar a estabilidade de um sistema, a margem de fase do mesmo deve permanecer entre 0° e 180° . Além do mais, com intenção desse sistema demonstrar baixo tempo de acomodação e ultrapassagem percentual (UP%) reduzida, é preciso verificar a frequência de passagem por 0 dB do mesmo (DORF & BISHOP, 2001), (OGATA, 2011).

A fim de mostrar o funcionamento do compensador projetado para o motor CC, o lugar geométrico das raízes do sistema e os diagramas de Bode sem controlador são apresentados na Figura 4.2.

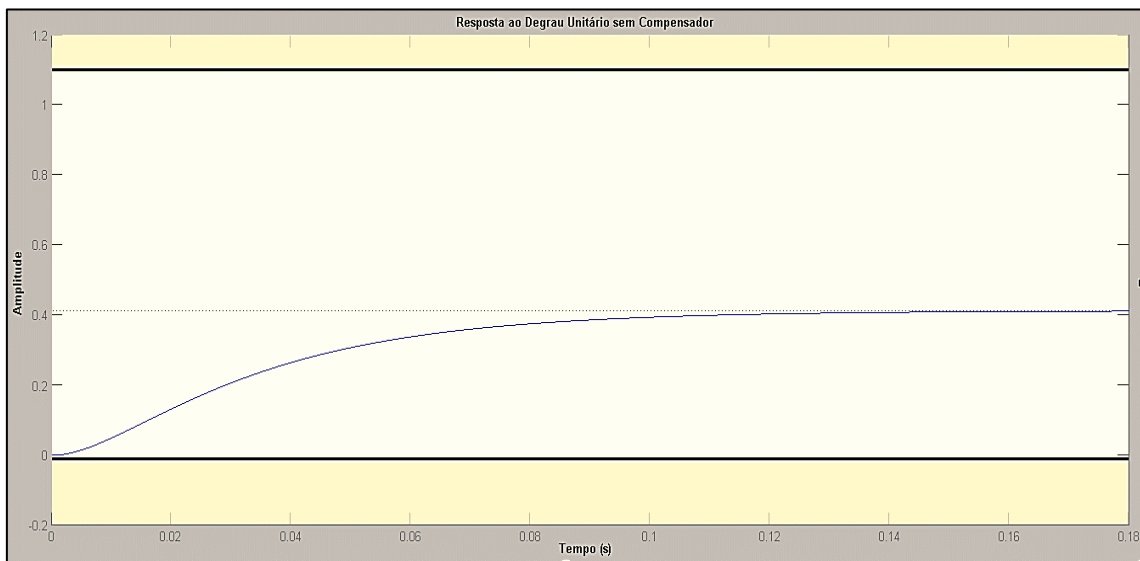
Figura 4.2 – Lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode do motor não controlado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Outro aspecto apresentado do sistema sem compensador, é a resposta do mesmo a um degrau unitário. Analisando o gráfico percebe-se que o sistema responde ao degrau de forma estável, porém não consegue chegar ao patamar desejado em um curto intervalo de tempo. A Figura 4.3 representa essa resposta.

Figura 4.3 – Resposta ao degrau unitário do motor CC sem compensador.



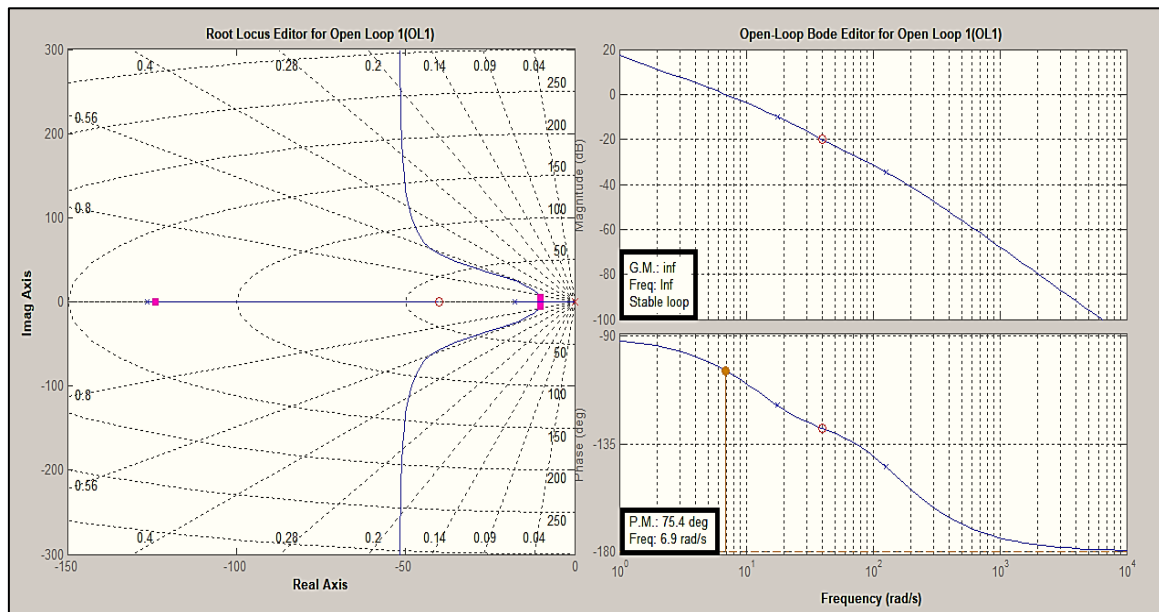
Fonte: Dados do próprio autor.

O controlador desenvolvido para atuar no processo de controle da velocidade angular do motor foi um compensador PI (Proporcional Integral). A partir de uma referência determinada, o controlador tem a função de equilibrar a diferença entre o sinal de referência imposta e o sinal de velocidade obtido no sistema. Assim, fica imposto a ele minimizar a zero o erro interno entre esses dois sinais na planta de controle do motor CC. O compensador projetado é mostrado em 4.1.

$$C_M(s) = 0,26 * \frac{(s + 40)}{s} \quad (4.1)$$

A inserção do compensador escolhido modificou o lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode do motor, mantendo dentre os requisitos de controle já mencionados, com uma margem de fase de 75,4°. Os novos gráficos compensados são mostrados na Figura 4.4.

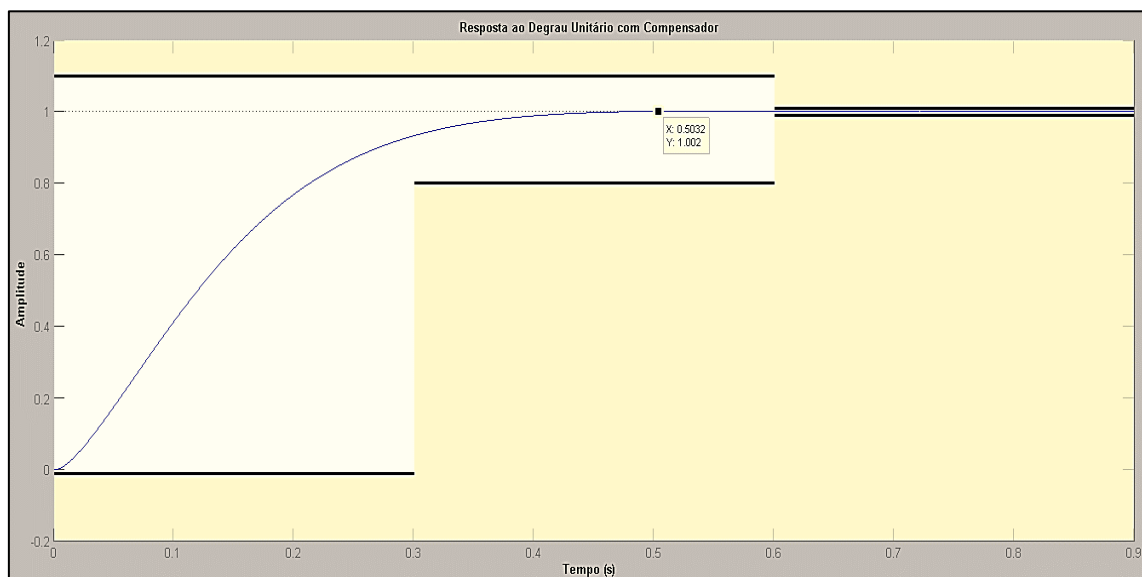
Figura 4.4 – Lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode do motor com compensador.



Fonte: Dados do próprio autor.

Mesmo não possuindo uma resposta rápida por causa da inércia do motor, o controlador no sistema permitiu o controle da maneira desejada do mesmo. A Figura 4.5 demonstra essa resposta do motor ao degrau unitário.

Figura 4.5 – Resposta ao degrau unitário com compensador.



Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 4.5 fica fácil perceber que a inserção do compensador otimizou a resposta do sistema tornando-o submisso às variações impostas nele. Ainda é possível observar que o motor consegue atingir o regime permanente em 0,5032s.

4.3. ESTRATÉGIA MPPT UTILIZADA NO CONVERSOR BOOST

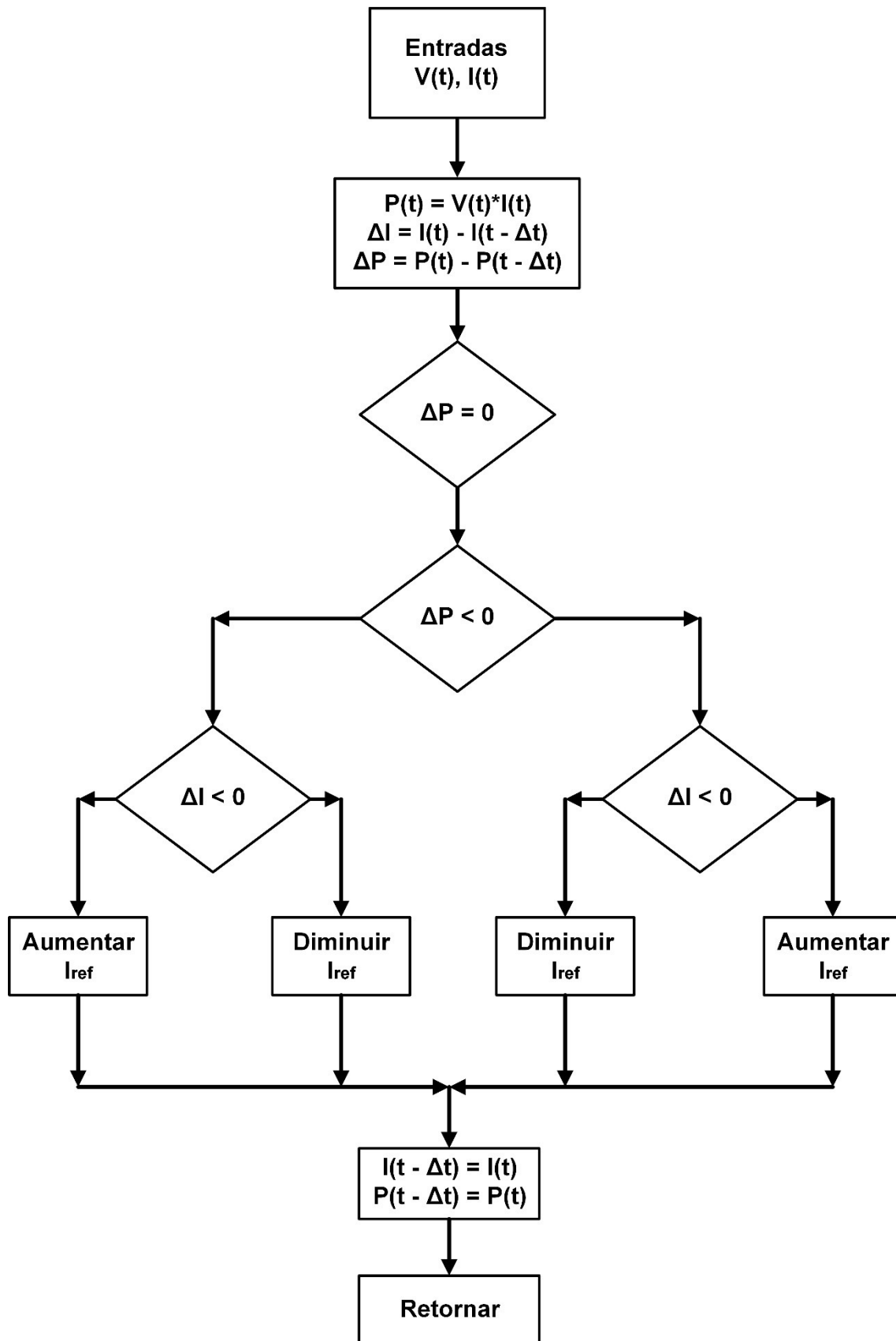
Como se fez o uso de uma máquina síncrona funcionando como gerador, suas características construtivas disponibilizam que para uma tensão de alimentação do campo fixa, diferentes valores de velocidades mecânicas no seu eixo fornecerão diferentes valores de tensões em seus terminais de saída. Como o vento é uma grandeza intermitente, e o motor CC está emulando essa grandeza, o eixo da máquina síncrona estará sempre com velocidade variável, consequentemente fornecendo tensões senoidais variáveis em seus terminais. Para diferentes níveis de operações é desejado a máxima potência disponível pelo sistema, e assim, um controle de suas grandezas foi realizado a partir da escolha das diversas técnicas de MPPT disponíveis.

Conforme discutido anteriormente, o método mais conhecido como “tabela de buscas”, mesmo sendo um método muito eficaz, possui o inconveniente de necessitar de muitas grandezas mecânicas e elétricas, o que aumenta o custo do protótipo a inserção de equipamentos de medição de todos os parâmetros necessários para a construção da tabela de buscas.

O segundo método de rastreamento de ponto de máxima potência, conhecido pelo princípio de “perturbar e observar” necessita apenas grandezas elétricas para realização do seu controle, deixando o custo do protótipo mais baixo e facilitando seu controle.

Como essa técnica é embasada em uma comparação de potência para diferentes valores de velocidade, foi realizada a leitura da tensão e corrente de entrada do conversor *Boost*. Tendo conhecimentos dos valores dessas variáveis, calcula-se a potência de saída do grupo máquina-gerador ($P_{Gret} = V_{Gret(n)} * i_{L(n)}$) e compara esse valor com a potência fornecida no instante anterior. Caso o incremento de corrente provoque um aumento de potência, o ponto de operação do sistema é deslocado nesse sentido. Caso contrário, o novo ponto de operação do sistema será deslocado no sentido contrário. A Figura 4.6 demonstra o fluxograma do algoritmo da técnica MPPT P&O utilizada.

Figura 4.6 – Fluxograma do algoritmo MPPT P&O utilizado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Um item importante na análise do comportamento da corrente na utilização de técnicas de MPPT se dá na escolha do passo de perturbação (Δi_L). A escolha de um passo maior o sistema chegará ao seu ponto máximo mais rápido, porém o mesmo ficará oscilando em torno do ponto máximo um tempo maior, causando maiores perdas de energia. Escolhendo um passo menor, o sistema irá demorar mais para encontrar seu ponto de máxima potência, mas a oscilação é menor, causando menos perdas.

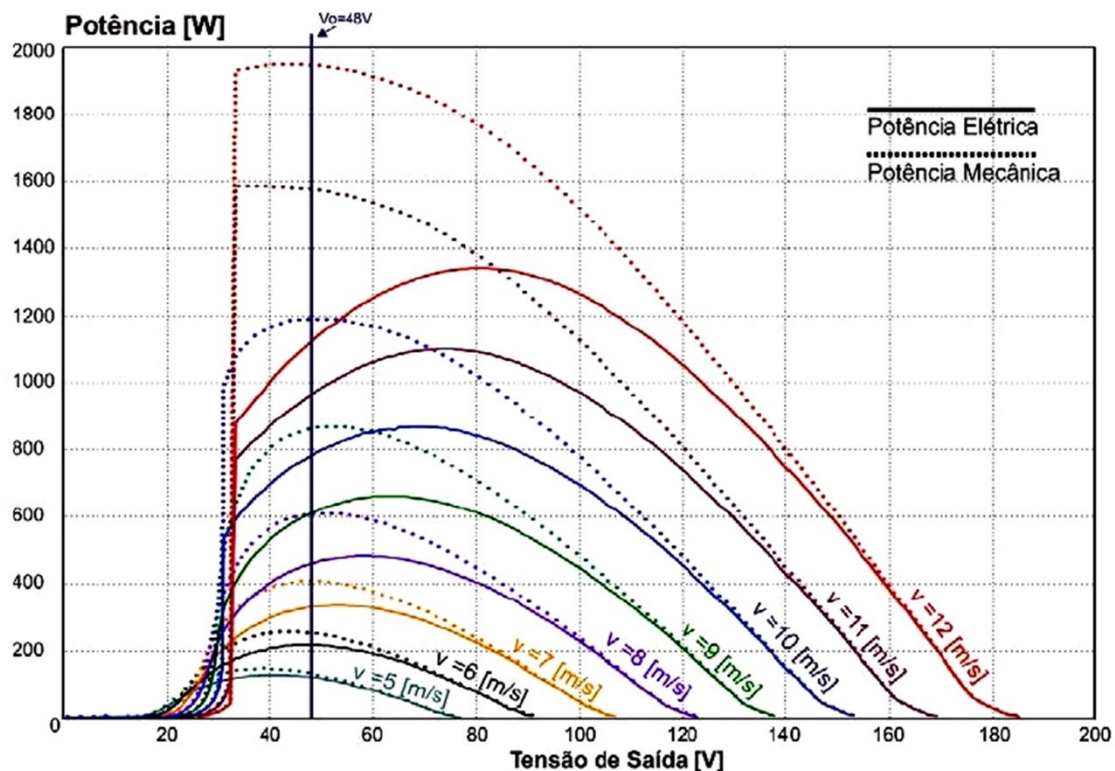
4.4. CARACTERÍSTICAS DE MÁXIMA POTÊNCIA EM UM SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE

Conhecendo os fundamentos da máxima transferência de energia e percebendo que o emulador eólico apresenta particularidades no fornecimento de potência, na qual é possível identificar a ocorrência de um valor máximo, torna praticável a aplicação de uma estratégia de acompanhamento desses valores de potência, a partir de um conversor CC. Esse processo é realizado através da alteração nos valores da razão cíclica baseado na leitura da energia extraída do sistema (TIBOLA, 2009). Do mesmo modo que a potência passa por um valor máximo para determinada tensão, consequentemente, sua corrente também terá um valor máximo nesse instante. Desta forma, ambas grandezas podem ser controladas no sistema eólico respeitando suas características construtivas.

Segundo (TIBOLA, 2009), os benefícios e os infortúnios de um sistema com e sem rastreamento serão apresentados a partir de simulações computacionais e gráficos, que exibem as características desse sistema, ainda complementando um referencial teórico para uso em projetos relacionados. Os mesmos podem ser obtidos para qualquer outra particularização de sistemas eólicos, especialmente de pequeno porte.

O primeiro teste mostra como o sistema possui um valor mínimo de tensão que o permite começar a entrar em operação. Esse gráfico é mostrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Gráfico informando valores mínimo e máximo de um sistema eólico de pequeno porte.



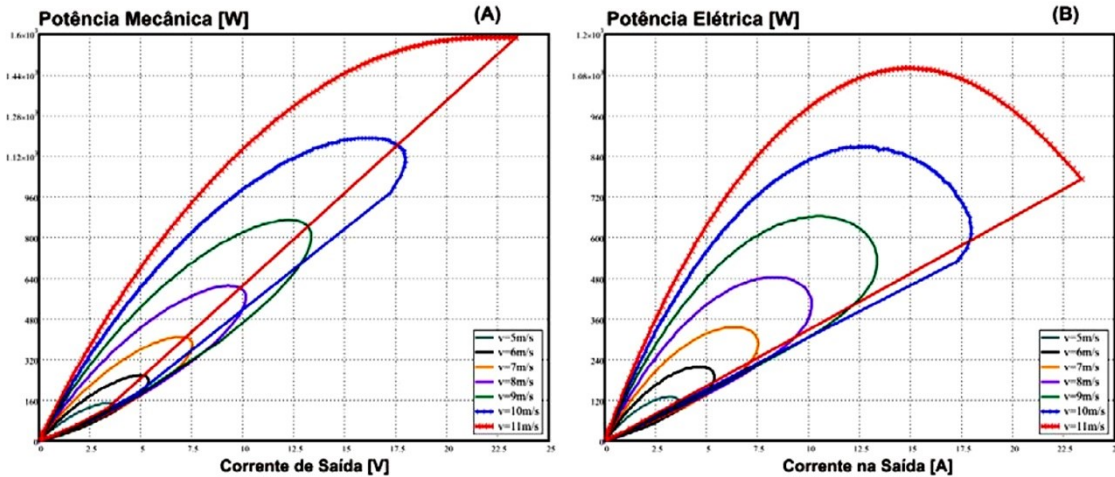
Fonte: (TIBOLA, 2009).

Analisando a Figura 4.7, os resultados para variação da tensão de saída, na ponte retificadora, realizados entre 0 e 200 volts para diferentes velocidades do vento obtém-se alguns resultados. O primeiro mostra um desempenho semelhante tanto para grandezas mecânicas quanto para grandezas elétricas na passagem por um ponto de valor máximo. O segundo informa o caso de ambas potências possuírem um valor inicial para seu crescimento, fato esse, que o sistema não consegue entregar potência pois não existe rotação suficiente na máquina. Como terceiro ponto, analisando, para este caso, a tensão de 48 volts as grandezas elétricas possuem um valor de potência máxima apenas para baixas velocidade, porém, a potência mecânica possui em todas as velocidades seu valor máximo nesse ponto. O gráfico permite analisar que os aerogeradores possuem um intervalo de tensão, no qual, demonstram uma melhor performance para qualquer valor de vento, neste caso, ocorrendo entre 48 e 100 volts para extração de energia (TIBOLA, 2009).

Como o sistema irá controlar a corrente de entrada do conversor CC-CC, um gráfico importante para esse controle seria a corrente injetada na sua entrada em relação

a potência elétrica do sistema. Esse gráfico é demonstrado na Figura 4.8. O mesmo se torna importante porque ele define qual valor de corrente o sistema começa a gerar energia e a partir do qual o sistema não responde mais aos incrementos de corrente, tornando o sistema instável.

Figura 4.8 – Potência elétrica e mecânica em relação a corrente de saída.



Fonte: (TIBOLA, 2009).

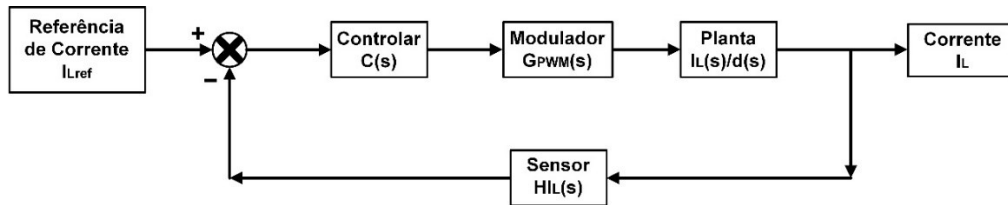
O gráfico da Figura 4.8, teve como variação da velocidade do vento 5 m/s à 11 m/s, acrescidos, um a um, metros por segundo. Um detalhe importante no gráfico se dá pelo fato que controle da corrente da máquina síncrona, aplicada em sistemas eólicos se torna mais complexo do que o controle da tensão. Isso ocorre porque a corrente não possui um comportamento linear. A curva possui um valor máximo, porém, seja qual for o incremento imposto nesse valor máximo, pode causar a instabilidade do sistema. Como o gerador síncrono é constituído por características que o definem como sendo uma fonte de tensão, seu controle necessita ser um pouco mais apurado para controlar uma grandeza que está sendo gerada. Dessa forma o controle da corrente se torna um pouco mais delicado devido sua instabilidade, sendo, porém implementável.

4.5. COMPENSADOR DE CORRENTE DO CONVERSOR BOOST

A técnica de modelagem do conversor CC-CC consistiu em um controlador $C(s)$ em cascata com o modulador $G_{PWM}(s)$ e a planta $i_L(s)/d(s)$ com realimentação do sensor $H_v(s)$. A planta do sistema foi demonstrada em (3.76).

A planta de controle tem o objetivo de compensar o erro do valor de corrente lido pelo sensor no sistema em relação a um valor de referência desejado. O esquemático do modelo de planta utilizado é representado na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Diagrama de blocos representando o controle de corrente de entrada.



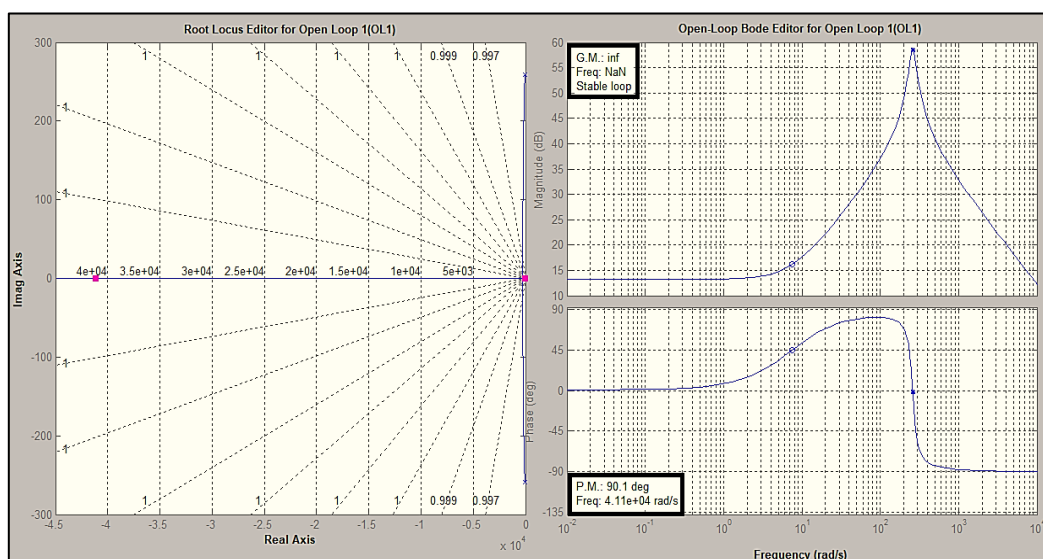
Fonte: Dados do próprio autor.

Simplificando o diagrama de blocos da Figura 4.9, considerando o modulador $G_{PWM}(s)$ e o sensor $H_V(s)$ com valores unitários, considerando as perdas no indutor (R_L) como sendo de $0,5\Omega$ e substituindo esse valor em (3.76), a planta $\hat{G}_{iL_D}(s)$ se torna:

$$\hat{G}_{iL_D}(s) = \frac{\hat{G}_{iL_D}(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{0,8281 * s + 6,244}{2,06810^{-5} * s^2 + 0,0009841 * s + 1,285} \quad (4.2)$$

No intuito de mostrar como o controlador desenvolvido interfere na dinâmica do sistema, serão demonstrados o lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode da planta não controlada e posteriormente os mesmos diagramas para a planta controlada. A Figura 4.10 informa os dados da planta não controlada.

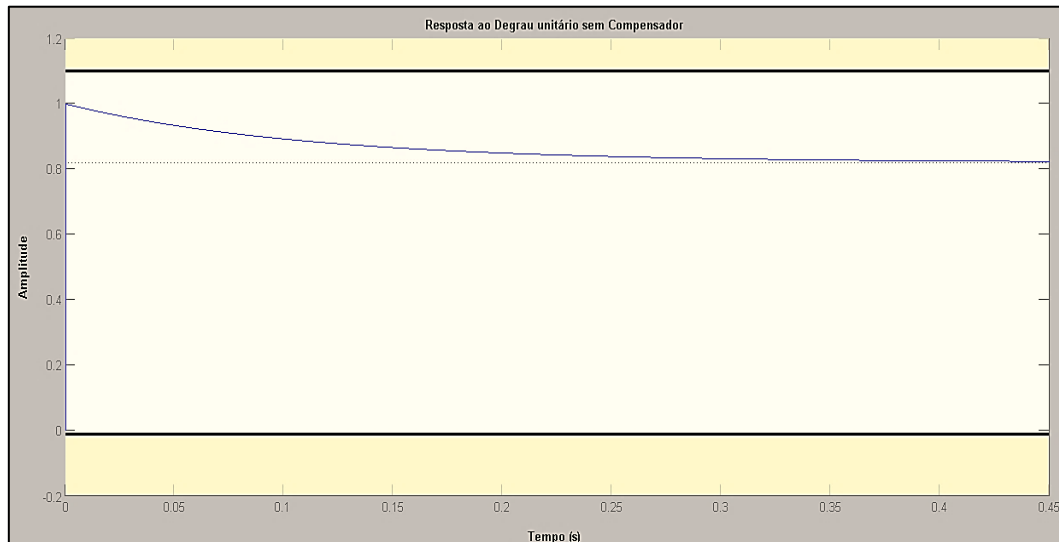
Figura 4.10 – Lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode da planta não controlada.



Fonte: Dados do próprio autor.

Outro gráfico que relata a estabilidade do sistema, mesmo sem o compensador, é a resposta ao degrau unitário. O mesmo mostra como o sistema se comporta a uma perturbação e sua capacidade de compensar esse erro. A Figura 4.11 mostra a resposta ao degrau unitário no sistema não controlado.

Figura 4.11 – Resposta ao degrau unitário do sistema não controlado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Percebe-se que tanto na Figura 4.10 quanto na Figura 4.11 as respostas do sistema não controlado se encaixam dentro dos valores de referência para um sistema estável, porém, com valores podendo ser otimizados.

No intuito de otimizar a resposta do sistema, foi desenvolvido um compensador que respeitasse a dinâmica do sistema e que fornecesse uma resposta rápida e eficaz no processamento da corrente.

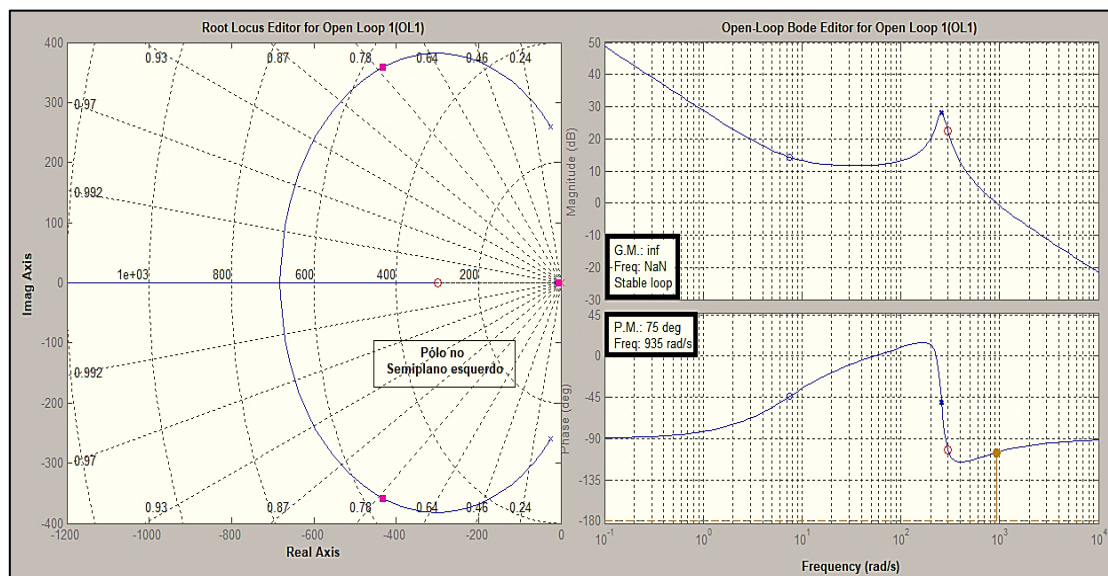
O uso do compensador na planta do conversor basicamente trabalha no intuito de corrigir o erro estático causado pela resposta do sistema em relação a referência desejada. No compensador, esse erro estático é corrigido inserindo um pólo na origem da função de transferência. A inserção de um zero na função de transferência do compensador, proporciona melhorias de resposta transitória no sistema em malha fechada, permitindo que o sistema se torne mais estável. Diante disso, o compensador mais adequado para o controle da corrente do conversor *Boost* deve possuir um pólo na origem e um zero.

A função de transferência do compensador é apresentada em (4.3).

$$C_{iL}(s) = 0,02 * \frac{(s + 300)}{s} \quad (4.3)$$

Os componentes da função de transferência do compensador como, o ganho, o zero e o pólo, foram adaptados para melhor atender os requisitos do sistema, respeitando suas características. A Figura 4.12 demonstra o lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode com compensador na planta do sistema.

Figura 4.12 – Lugar geométrico das raízes e os diagramas de Bode com compensador no sistema.



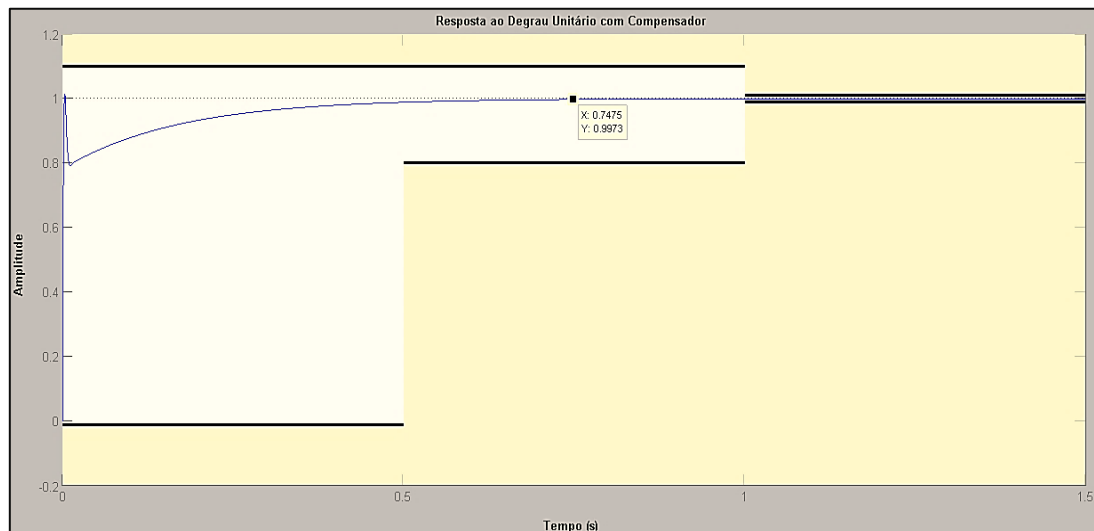
Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 4.12, percebe-se que o sistema é estável para a escolha do polo escolhido, pois, este se encontra no semiplano esquerdo. Com a inserção do compensador projetado a nova margem de fase do sistema passou a ser de 75°. Esse valor de margem de fase fica dentro de um dos critérios de projeto adotado como sendo a margem de fase maior que 45°, na qual proporciona resposta ao degrau unitário com melhor ultrapassagem percentual. O segundo critério adotado foi a frequência de passagem por 0 dB menor que a frequência de chaveamento, aproximadamente 1/10, no intuito de garantir que o sistema funcione como um filtro para ruídos em alta frequência e grande o suficiente para determinar uma resposta transitória mais rápida.

Ao empregar o controlador PI mostrado em (4.3) o sistema passou a ter uma resposta robusta e precisa dentro das suas características de resposta, garantindo assim, que a corrente de entrada do conversor *Boost* acompanhasse os degraus de referência de

corrente impostos pelo MPPT sem que ocorresse perda de potência. Esse aperfeiçoamento é apresentado na Figura 4.13, que representa a resposta do sistema ao degrau unitário. Analisando a figura, percebe-se que o sistema assume o regime permanente no tempo de 0,7475s.

Figura 4.13 – Resposta do sistema com compensador ao degrau unitário.



Fonte: Dados do próprio autor.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os compensadores projetados para o motor e para o conversor Boost. Foram relatadas as situações iniciais e posteriores da inclusão dos controladores nas malhas de controle de cada dispositivo, validando seu desenvolvimento.

Também foram apresentadas as estratégias utilizadas para a extração de máxima potência do sistema com a utilização de um algoritmo MPPT, levando em consideração as características construtivas do grupo motor-gerador e o desenvolvimento de um compensador que maximizou as respostas do sistema chegando a um patamar desejado.

Destaca-se a utilização de método de extração de máxima potência P&O clássico especificado na literatura que possibilitou o sistema funcionar dentro dos seus limites, não danificando os princípios de operação das máquinas e fornecendo resultados com maior credibilidade, assemelhando a sistemas de operação em escala real.

O capítulo 5 irá demonstrar os resultados de simulação e experimentais que validarão as estratégias de controle apresentadas no presente capítulo.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

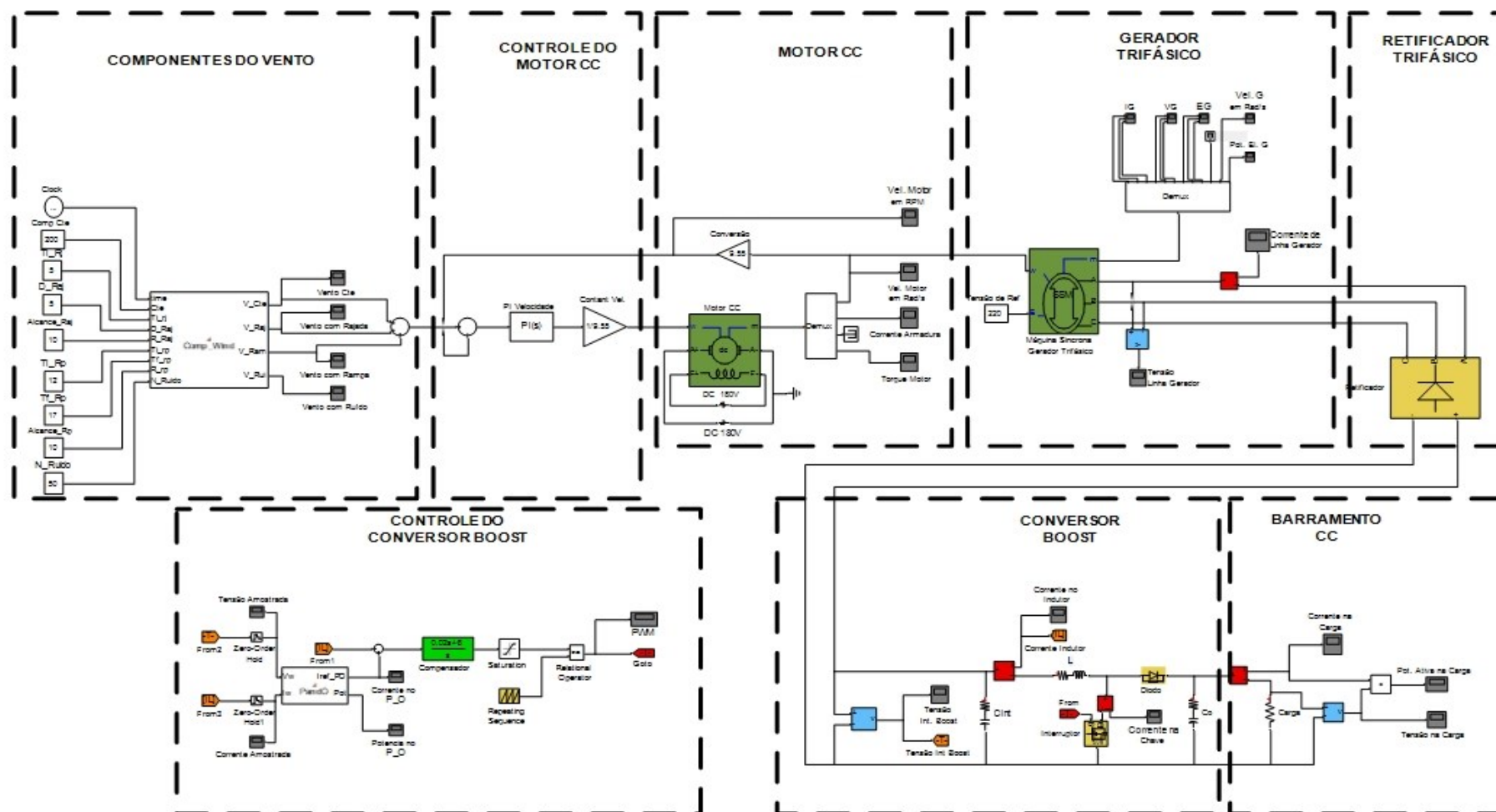
Neste capítulo serão apresentados os principais resultados de simulação e experimentais do sistema proposto. Os efeitos das simulações para o controle de corrente em malha aberta e fechada, as formas de onda nos terminais da máquina síncrona, a saída do retificador trifásico e as formas de operação do conversor CC-CC Boost foram exibidos para algumas situações impostas para o sistema. Já os resultados experimentais apontaram o funcionamento do protótipo em situações semelhantes que comprovasse o funcionamento do mesmo.

O sistema completo é composto por: um motor CC, uma máquina síncrona, um retificador trifásico não controlado e um conversor *Boost*. As simulações foram realizadas de modo a reproduzir diversas condições de operação dos aerogeradores. O protótipo foi submetido a situações semelhantes à da simulação, respeitando as limitações de cada componente utilizado, validando sua estrutura em comparação com os resultados computacionais obtidos.

5.2. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA

A Figura 5.1 apresenta o circuito de potência juntamente com a estratégia de controle do sistema completo na plataforma computacional utilizada.

Figura 5.1 – Circuito de potência e diagrama de controle na plataforma computacional Matlab®.



Fonte: Dados do próprio autor.

O sistema será dividido em cinco partes: estudo das componentes do vento, motor de corrente contínua, máquina síncrona, retificador trifásico e conversor *Boost*.

5.2.1. COMPONENTES DO VENTO

No intuito de analisar os distúrbios provocados pelo vento nos aerogeradores, foram elaboradas as formas de ondas que representam os principais tipos do vento, que são elas: constante, rajada, rampa e ruído. O valor resultante das quatro representantes do vento pode ser calculado em (5.1). Essas formas de ondas relacionam as grandezas de tensão e tempo. A tensão será interpretada pelo controle do motor como um nível de velocidade que o motor deverá alcançar, emulando assim, as perturbações causadas nas turbinas eólicas.

$$V_w = V_m + V_{rp} + V_{rj} + V_{rd} \quad (5.1)$$

Onde:

V_m - Velocidade média do vento;

V_{rp} - Componente em rampa;

V_{rj} - Componente em rajada;

V_{rd} - Componente em ruído.

A representante do vento constante foi interpretada como um sinal de tensão constante imposta pelo usuário, representado como um sinal constante na velocidade da máquina. Em (5.2) representa essa componente.

$$V_m = k \quad (5.2)$$

As componentes rajada, rampa e ruído foram modeladas de acordo com (ANDERSON & BOSE, 1983). Suas formas de onda são esquematizadas de acordo com cada equacionamento a seguir.

A componente rajada é demonstrada em (5.3) e (5.4).

$$V_{rj} = \begin{cases} 0 & t < T_{irj} \\ V_{rj} & T_{irj} < t < T_{irj} + T_{rj} \\ 0 & t > T_{irj} + T_{rj} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$V_{rj} = \left(\frac{R_{max}}{2} \right) \cdot \left\{ \left\{ 1 - \cos 2\pi \left[\left(\frac{t}{T_{rj}} \right) - \left(\frac{t_{irj}}{T_{rj}} \right) \right] \right\} \right\} \quad (5.4)$$

Onde:

t - Tempo;

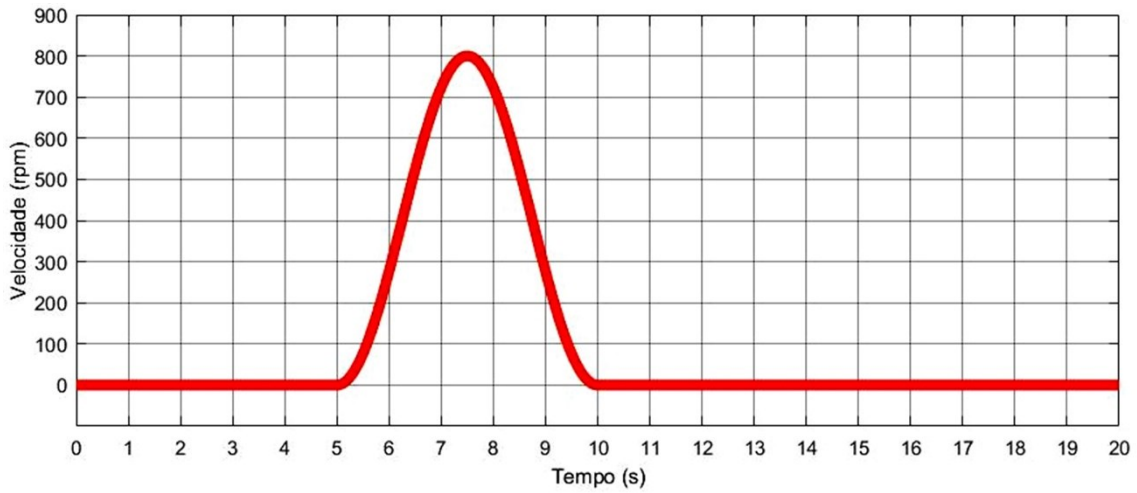
T_{irj} - Tempo inicial da componente rajada;

T_{rj} - Duração da componente rajada;

$R_{rj_{max}}$ - Valor máximo da componente rajada.

A resposta gráfica para a componente rajado é demonstrada na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Componente rajada do vento.



Fonte: Dados do próprio autor.

No gráfico da Figura 5.2, percebe-se que a componente rajada teve início no tempo de cinco segundos com seu término em dez segundos. Sua amplitude alcançou a velocidade de oitocentos metros por segundo, definindo bem a componente rajada do vento.

A componente rampa é definida de acordo com (5.5) e (5.6).

$$V_{rp} = \begin{cases} 0 & t < t_{irp} \\ V_{rp} & t_{irp} < t < t_{frp} \\ 0 & t > t_{frp} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$V_{rp} = R_{max} \cdot \left(1 - \frac{(t - t_{frp})}{(t_{irp} - t_{frp})} \right) \quad (5.6)$$

Onde:

t - Tempo;

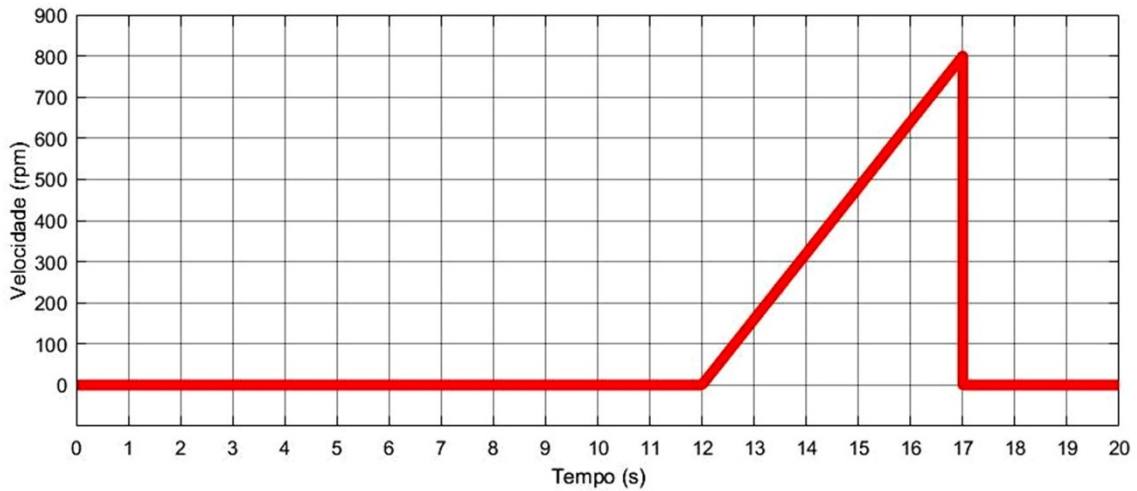
T_{irp} - Tempo inicial da componente rampa;

T_{frp} - Tempo final da componente rampa;

Rrp_{max} - Valor máximo da componente rampa.

A forma de onda da componente rampa é informada na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Componente rampa do vento.



Fonte: Dados do próprio autor.

A componente rampa, demonstrada na Figura 5.3, teve duração de cinco segundos, começando em doze segundos e terminando em dezessete segundos. Seu valor máximo chegou na velocidade de oitocentos metros por segundo, caindo abruptamente a zero logo em seguida, especificando a componente rampa do vento.

Analisando as componente rajada e rampa, percebe-se que ambas ocorrem em um intervalo de tempo definido. Na prática esses intervalos de tempo não podem ser previstos, já que o vento varia sua intensidade e direção de forma irregular. Por isso, para se analisar tais componentes e suas causas no sistema foi estipulado um tempo inicial e final, informando ao controle quando cada ação será realizada.

Por fim, a componente ruído é equacionada da seguinte maneira.

$$V_{rd} = 2 \sum_{i=1}^N [S_v(W_i) \Delta W]^{(\frac{1}{2})} \cos(W_i \cdot t + \phi_i) \quad (5.7)$$

$$W_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta W \quad (5.8)$$

$$S_v(W_i) = \frac{2K_n F^2 |W_i|}{\pi^2 \left[1 + \left(\frac{FW_i}{\mu\pi}\right)^2\right]^{\frac{4}{3}}} \quad (5.9)$$

Onde:

ΔW - Variação de velocidade [rad/s];

ϕ_i - Variável randômica com densidade de probabilidade uniforme no intervalo de 0 a 2π ;

K_n - Coeficiente de arrasto da superfície;

F - Escala de turbulência;

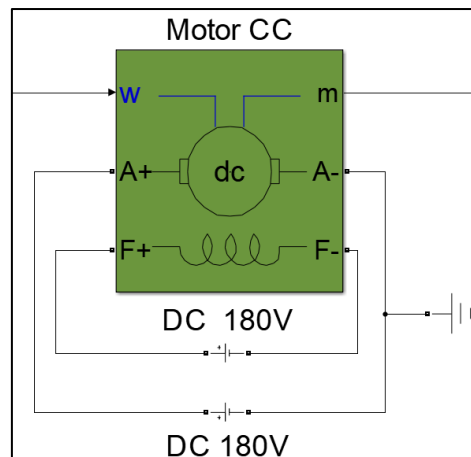
N - Limite do somatório

Como a componente ruído é composta por um sinal variável e empírico, a variável N apresentada em (5.7) foi especificada no valor de cinquenta. Esse valor foi estabelecido por meio de análise, comprovando que esse valor representou um bom resultado para o sistema.

5.2.2. MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

A Figura 5.4 mostra o modelo de motor de corrente contínua utilizado na simulação computacional.

Figura 5.4 – Modelo do motor CC utilizado do software de simulação.



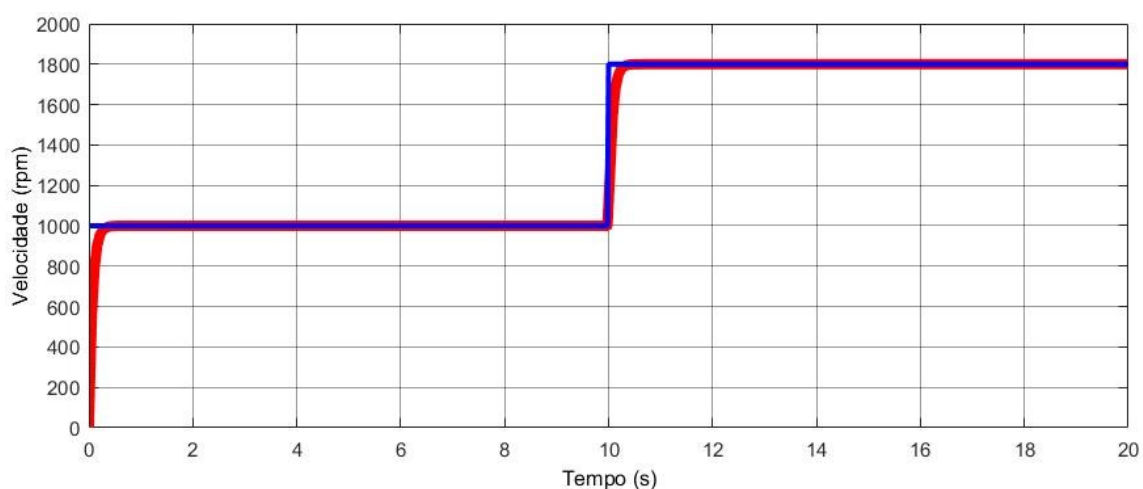
Fonte: Dados do próprio autor.

O esquemático da Figura 5.4 demonstra como o modelo do motor CC funciona, no qual cada variável representa uma funcionalidade. A variável “ w ” representa o sinal no qual será controlado, que nesse caso foi a velocidade da máquina. Os termos “ $A+$ ” e “ $A-$ ” representam a alimentação da armadura do motor, “ $F+$ ” e “ $F-$ ” informam sua tensão de campo. O fator “ m ” expressa os principais parâmetros de medição do motor, que são: velocidade, corrente na armadura, corrente de campo e torque.

Como o motor foi utilizado com excitação independente em seu campo, o controle de velocidade ocorreu a partir da variação da tensão de armadura em uma fonte de tensão controlada, conectada em série com sua resistência e indutância. Assim, sua velocidade será proporcional à tensão aplicada em sua armadura.

A fim de avaliar o controlador PI projetado para o controlar a tensão entregue na armadura do motor, foi realizada a análise do controle estipulando um nível de tensão, comparando a resposta do controlador ao acompanhamento da referência estipulada. A Figura 5.5 mostra o resultado no controlador operando.

Figura 5.5 – Velocidade de rotação controlada do motor CC.



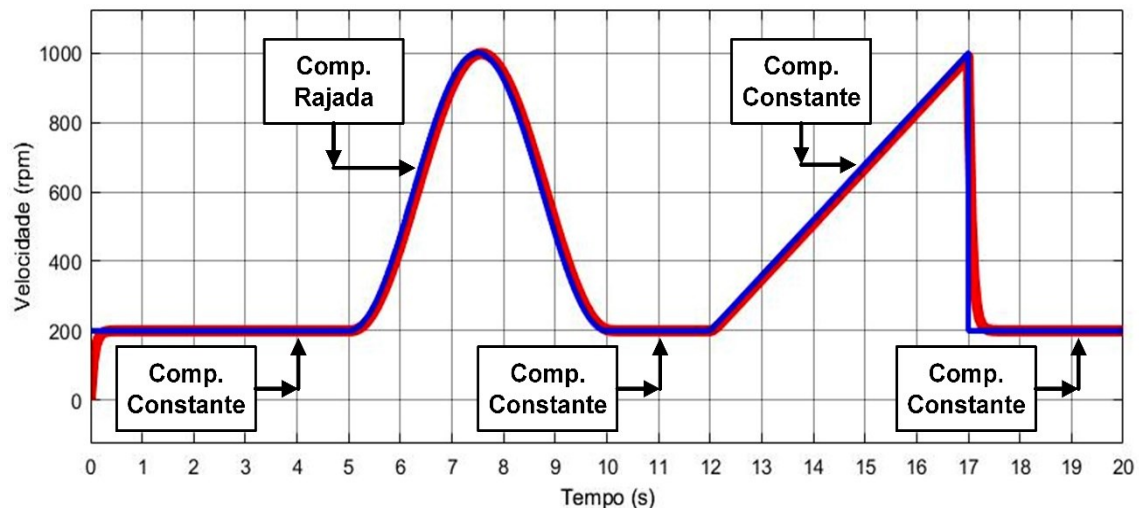
Fonte: Dados do próprio autor.

O gráfico da Figura 5.5, mostra o controlador projetado atuando no controle da velocidade de rotação do motor CC (estipulada na cor vermelha) em uma referência (definida na cor azul) de 1000 rpm até o tempo de dez segundos e logo após esse tempo sofrendo um degrau de velocidade, alcançando seu valor nominal de 1800 rpm. Analisando o gráfico fica claro que o controle da máquina foi realizado de forma satisfatória, respeitando a estrutura da mesma e alcançando a velocidade desejada.

Após comprovar o funcionamento do controlador foi estipulado ao motor os sinais provenientes do vento. Esses sinais emulam as características que o vento provoca nos aerogeradores resultando em um estudo em escala laboratorial.

A forma de onda que representa as principais características do vento, emuladas pelo funcionamento do motor é demonstrada na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Motor emulando as componentes do vento.



Fonte: Dados do próprio autor.

5.2.3. MÁQUINA SÍNCRONA

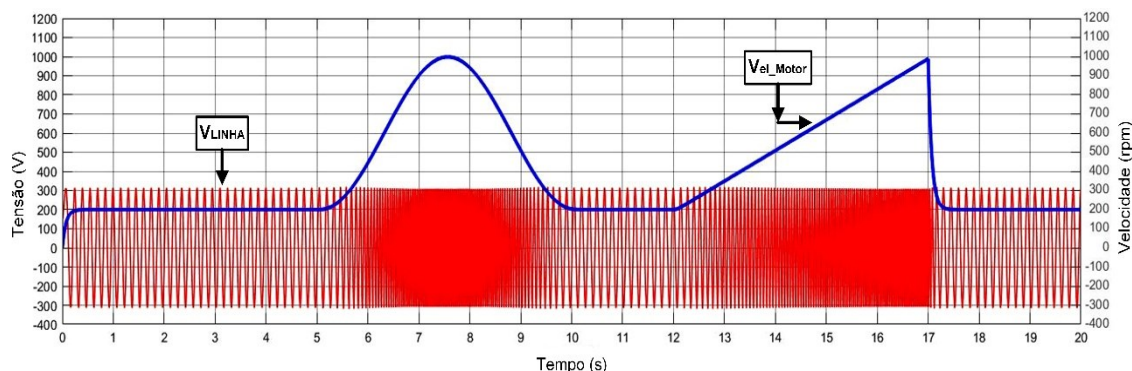
A máquina síncrona será utilizada como gerador síncrono já que seu eixo será conectado ao eixo do motor CC através de um acoplamento mecânico. Assim, todo movimento realizado pelo motor irá ser refletido também no gerador. O gerador síncrono foi estudado com sua interligação realizada na forma delta gerando uma tensão de 220V em condições nominais.

Como a máquina síncrona gera uma tensão com amplitude e frequência variáveis a partir do nível de velocidade do seu rotor, a máquina só irá entregar uma tensão com valores nominais de amplitude e frequência quando seu rotor estiver em velocidade nominal. Analisando tal característica, como a velocidade irá variar em alguns intervalos de tempo, para a interpretação das características do vento, características nominais de tensão geradas pela máquina serão verificadas em curtos intervalos de tempo.

Desta forma, não foi aplicado nenhum controle na máquina síncrona já que a potência será processada pelo conjunto composto pelo retificador trifásico e conversor CC-CC conectado nos terminais do gerador síncrono.

A Figura 5.7 mostra a variação em uma das três fases de tensão na saída da máquina síncrona.

Figura 5.7 – Tensão gerada entre duas fases da máquina síncrona.

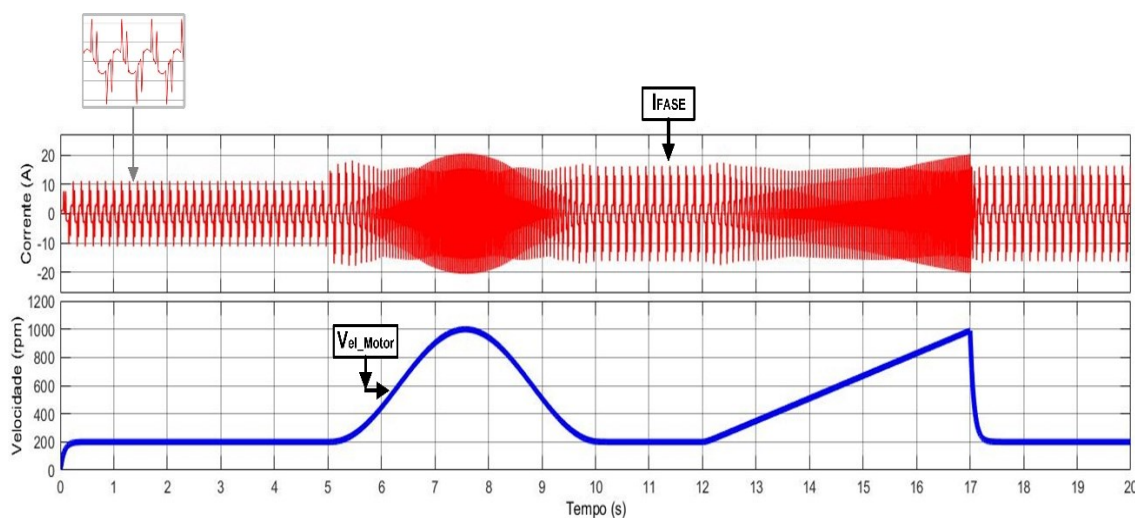


Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 5.7, nota-se que a tensão em uma das fases tem o comportamento esperado de uma máquina síncrona, na qual altera sua frequência com o aumento de velocidade do motor CC, que tem seus eixos solidários. Percebe-se também uma pequena oscilação em sua amplitude com a variação da velocidade.

A Figura 5.8 mostra a corrente resultante, em uma das fases, nos terminais de saída da máquina síncrona.

Figura 5.8 – Corrente gerada em uma das fases da máquina síncrona.



Fonte: Dados do próprio autor.

Na Figura 5.8 nota-se que o mesmo efeito ocorrido na tensão também é verificado na corrente da máquina síncrona. Como a máquina não está operando em sua velocidade nominal (1800 rpm) isso acarreta o aparecimento de níveis harmônicos na sua corrente gerada, evidenciado pelo *zoom* no topo da figura. Quando ocorre sua aceleração, a frequência da corrente também cresce, caracterizando o funcionamento da máquina síncrona.

5.2.4. RETIFICADOR TRIFÁSICO

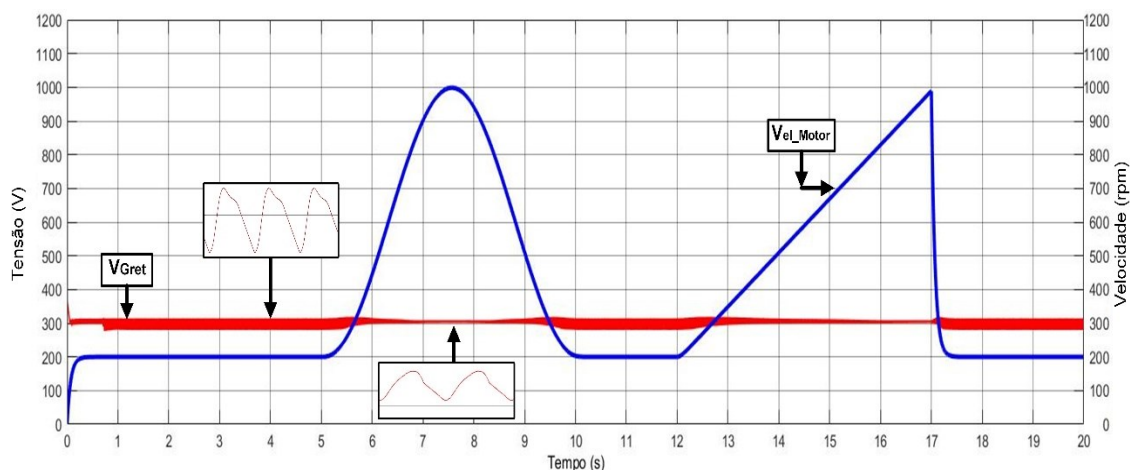
O retificador trifásico em ponte de Graetz foi conectado na saída do gerador síncrono para retificar suas tensões e correntes senoidais.

O retificador utilizado não possuiu nenhum tipo de controle, sendo que a energia gerada será processada pelo conversor *Boost*. Portanto, o retificador tem o único propósito de fornecer um nível contínuo de tensão e corrente na entrada do conversor.

Como o sistema não será conectado na rede elétrica, funcionando de maneira isolada, não se preocupou com os distúrbios gerados pelo retificador em níveis de qualidade de energia elétrica.

A Figura 5.9 demonstra a forma de onda na saída do retificador trifásico.

Figura 5.9 – Nível de tensão na saída do retificador trifásico.



Fonte: Dados do próprio autor.

Verificando a Figura 5.9, o aumento da velocidade de rotação do motor CC provoca um leve aumento na amplitude da tensão retificada (gráfico na cor vermelha),

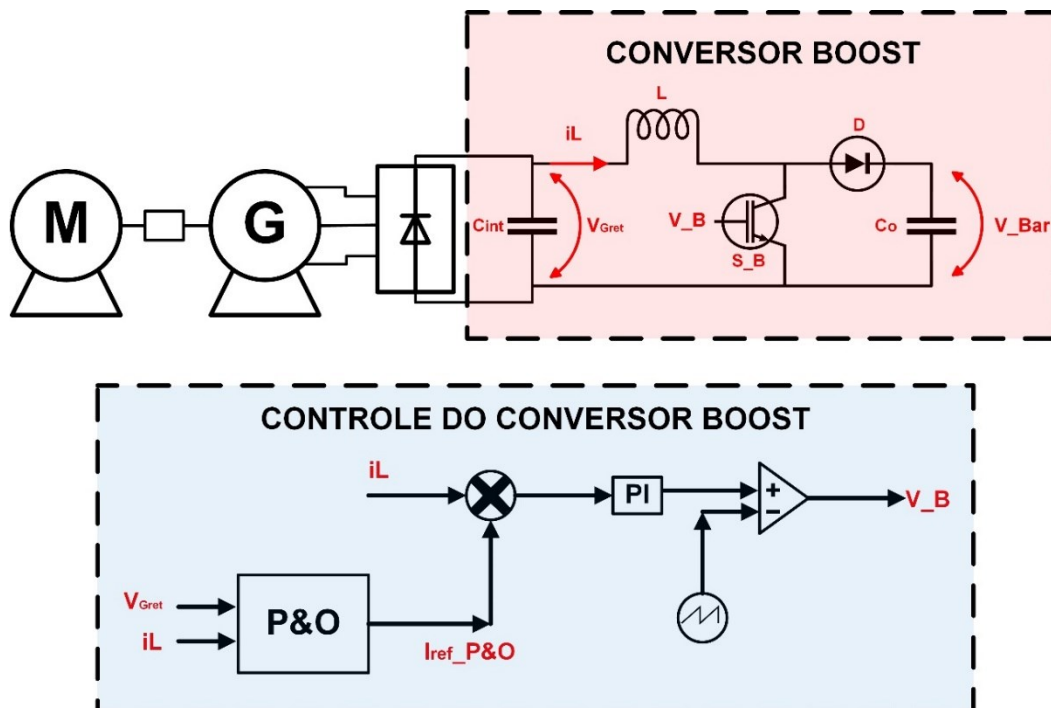
porém, a tensão ainda se mantém próximo ao valor definido como tensão base para sua geração.

5.2.5. CONVERSOR *BOOST*

O conversor CC-CC utilizado foi o Boost em sua topologia clássica, como foi mostrado na Figura 5.1.

O conversor é responsável por executar a extração de máxima potência do sistema através do algoritmo P&O. Levando em consideração que o nível de tensão nos terminais do retificador controlado depende da operação do grupo motor-gerador, o controle da potência extraída do sistema é realizado através do controle da corrente de entrada do *Boost*. A Figura 5.10 demonstra o conversor *Boost* e seu controle realizado.

Figura 5.10 – Conversor *Boost* e seu controle.



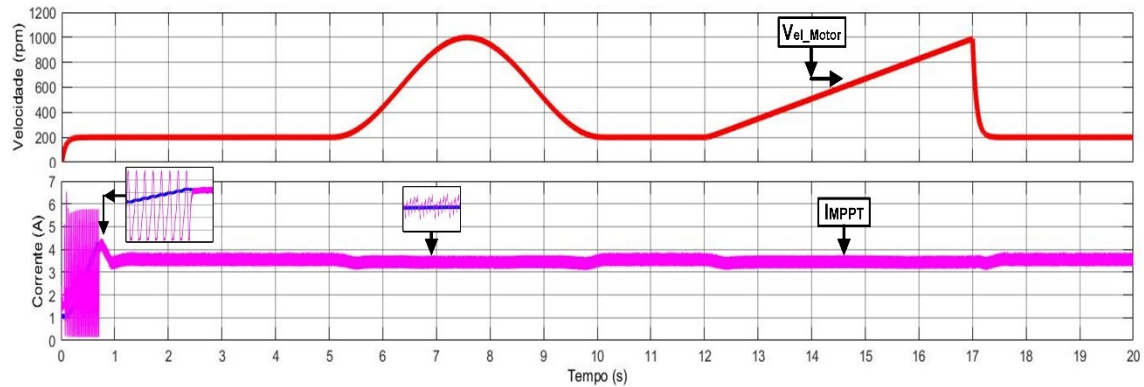
Fonte: Dados do próprio autor.

Como o sistema que está gerando energia elétrica possui características lentas, a amostragem da corrente no indutor e da tensão de entrada no conversor ocorreu na ordem de 1kHz.

O controlador de corrente e o algoritmo do MPPT que atuam no controle do conversor *Boost* foram validados a partir de um valor de corrente especificado como

referência e com base no nível de corrente que estava sendo gerado, possibilitou a extração da máxima potência do sistema. A Figura 5.11 demonstra a resposta do conversor para o controlador elaborado juntamente com o algoritmo P&O em funcionamento.

Figura 5.11 – Resposta do controle estipulado no conversor *Boost*.

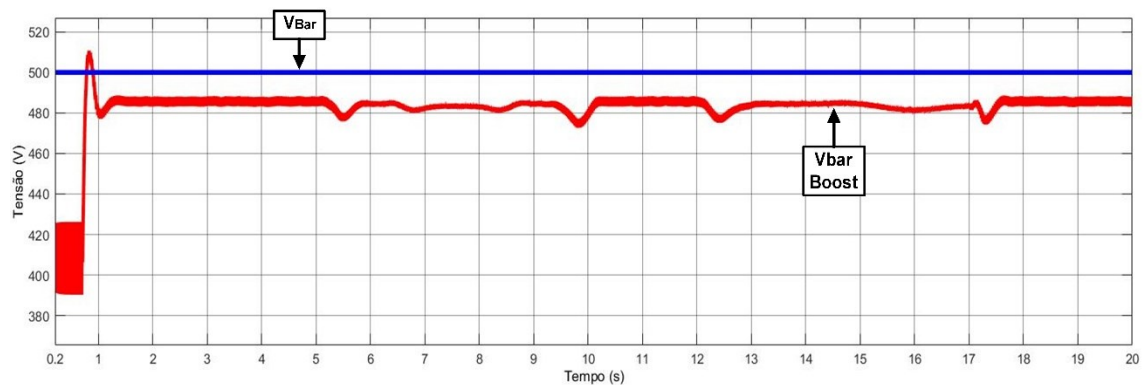


Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando a Figura 5.11, percebe-se que a variação de velocidade do motor CC interfere na corrente gerada pela máquina síncrona. Porém, o controle de MPPT implementado manteve o valor gerado (gráfico, na cor rosa) próximo ao valor de referência (gráfico, na cor azul).

Como a estratégia de controle do conversor foi implementado através da imposição da sua corrente de entrada, o nível da sua tensão de saída é consequência do montante de energia processada pelo *Boost*. Desta forma, a tensão de saída do conversor *Boost* é evidenciada na Figura 5.12.

Figura 5.12 – Tensão na saída do conversor *boost*.



Fonte: Dados do próprio autor.

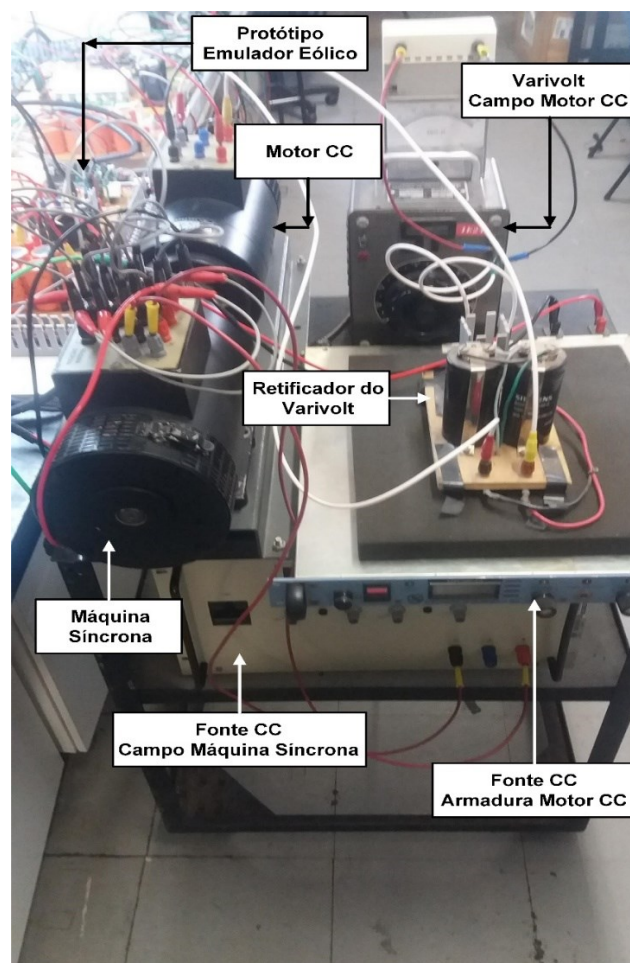
Analisando a Figura 5.12, a tensão produzida na saída do conversor, mesmo com todas as oscilações provocadas pela variação da velocidade do motor CC, se mantém em um valor médio de 484 V, 3% abaixo do valor de referência de 500 V. Assim, o controle da corrente de entrada do *Boost* se manteve dentro de valores aceitáveis, validando o método utilizado.

5.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.3.1. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO E SUAS ESPECIFICAÇÕES

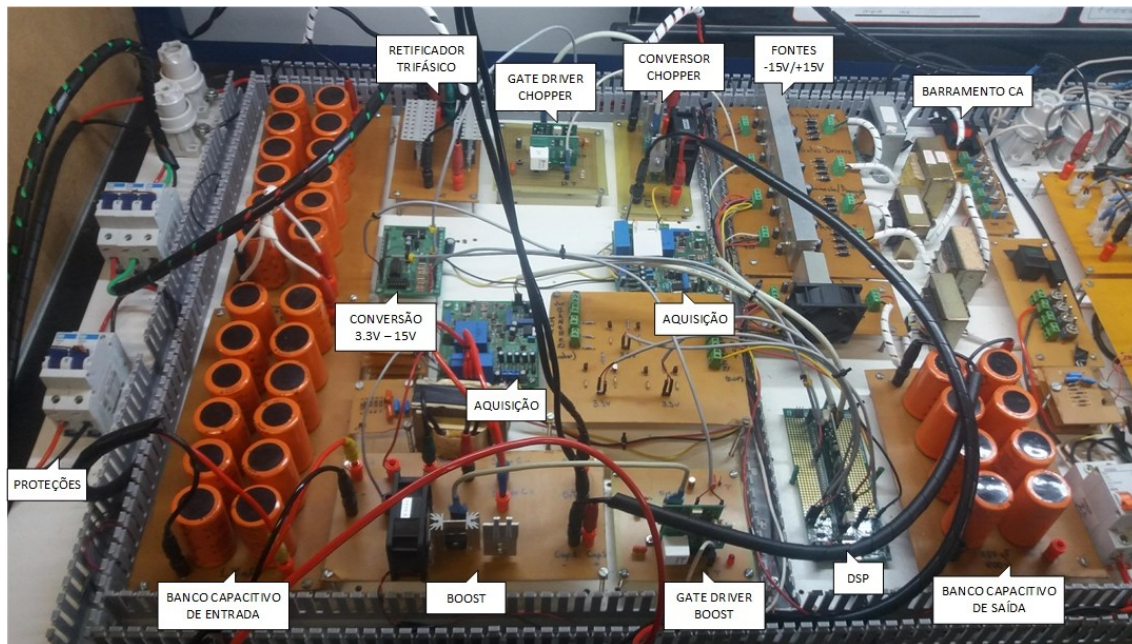
Foi desenvolvido um protótipo emulador eólico para a validação dos resultados obtidos por meio das simulações computacionais. O protótipo foi montado com capacidade máxima de 1 kW. A Figura 5.13 mostra o sistema completo montado, a Figura 5.14 evidencia o protótipo construído e a Tabela 5.1 demonstra os dados dos principais componentes utilizados.

Figura 5.13 – Sistema completo montado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.14 – Protótipo emulador eólico construído.



Fonte: Dados do próprio autor.

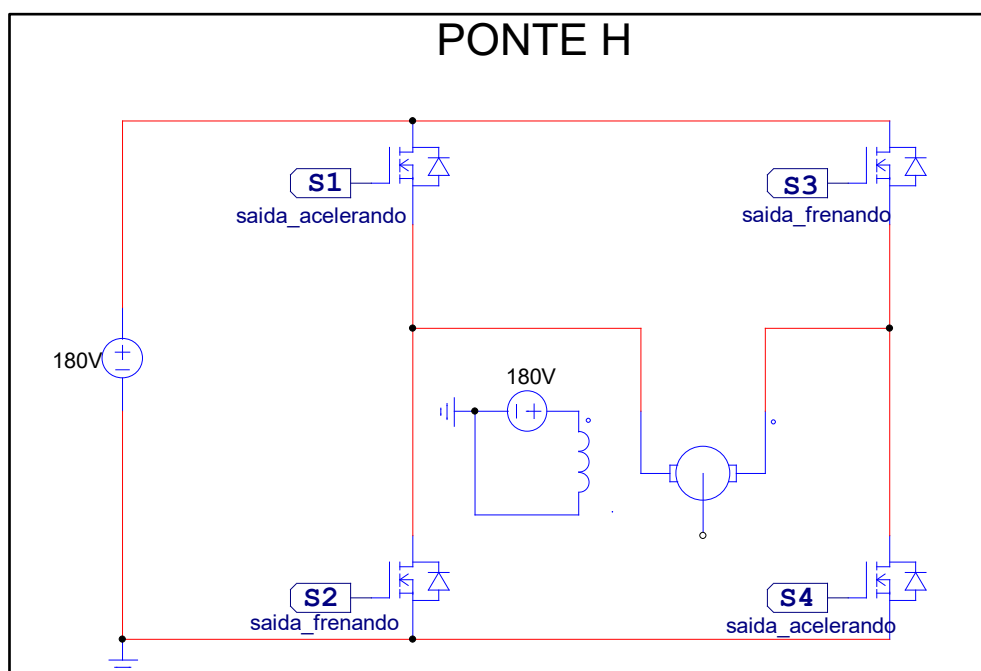
Tabela 5.1 – Parâmetros dos principais componentes utilizados no protótipo.

Componente	Especificação
Indutor L	Núcleo de Ferrite; 7mH
Capacitores C_1	Associação de capacitores eletrolíticos: 1,39mF
Capacitor C_{BAR}	Associação de capacitores eletrolíticos: 457 μ F
Interruptores S_M	IGBT – IRG4PC40KD: 600V; 25A
Interruptor S_B	IGBT – IRG4PH50UD: 1200V; 24A
Diodo D_M	APT30D60B: 600V; 30A
Diodo D_B	APT30D100B: 1000V; 30A
Microcontrolador	DSP – TMS320F28335

Fonte: Dados do próprio autor.

Inicialmente o acionamento do motor seria implementado por um circuito denominado de Ponte H, como representado na Figura 5.15.

Figura 5.15 – Circuito da Ponte H.

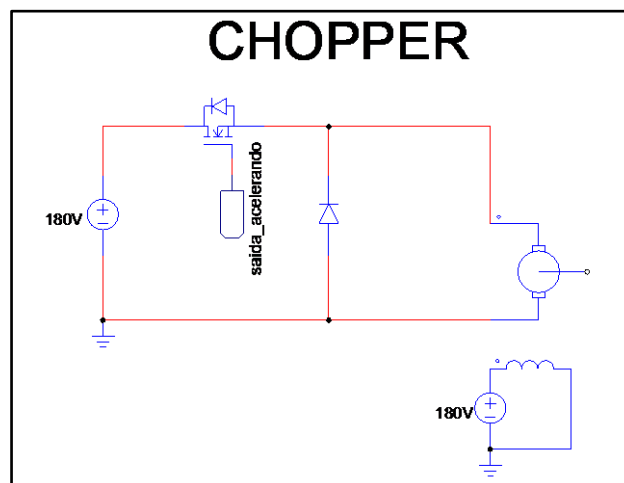


Fonte: Dados do próprio autor.

Esse circuito opera alternando a polarização e o bloqueio dos interruptores S1/S4 e S2/S3. A vantagem desse circuito é que dependendo da forma que ocorre o chaveamento dos interruptores, a energia entregue ao motor pode estar na mesma polaridade da fonte ou em sentido contrário, proporcionando assim que o motor gire no sentido horário ou anti-horário. A placa desse circuito foi montada e testada no protótipo. Porém, a operação da ponte alternando a polarização e bloqueio dos interruptores provocou oscilações mecânicas no eixo do motor, prejudicando sua operação de acordo com a estratégia de controle adotada.

Como o circuito da Ponte H não forneceu um controle satisfatório para o acionamento do motor, foi utilizado um *chopper* para tal finalidade. Esse circuito é composto por um interruptor e por um diodo, conforme ilustra a Figura 5.16.

O interruptor tem a função de controlar o fluxo de energia da fonte que será entregue a carga e o diodo tem a função de proporcionar a carga um caminho de retorno da corrente.

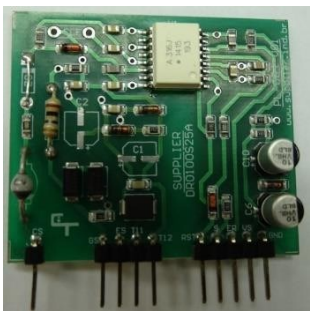
Figura 5.16 – Circuito do *chopper* utilizado.


Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando o esquemático da Figura 5.16, como o circuito utiliza apenas um interruptor, ele controla o fluxo de energia apenas em um sentido, pois a energia entregue ao motor terá sempre a mesma polaridade da fonte de alimentação, acarretando apenas um sentido de rotação para o motor CC. Como o propósito do controle do motor era apenas acelerar ou diminuir sua velocidade de rotação, o circuito do *chopper* utilizado foi prático e eficaz. A utilização de apenas um interruptor ao invés de quatro, como seria usado no circuito da Ponte H, tornou o protótipo economicamente mais viável.

O acionamento dos interruptores tanto na placa do *chopper* quanto na placa do conversor *Boost* foram implementados utilizando-se o circuito de gatilho simples (*gate driver simples*) DRO10025A da *Supplier*[®]. Essa placa possui em sua estrutura a proteção contra curto circuito através do monitoramento da tensão entre coletor e emissor. Essa placa com suas principais características é mostrada na Tabela 5.2.

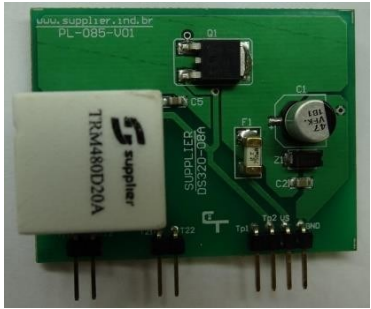
Tabela 5.2 – Placa do *gate driver simples*.

	Tensão de alimentação: 15 V
	Frequência de comutação: até 100 kHz
	Tensão de monitoramento entre coletor e emissor: 1000 V
	Tensão de gatilho ligado: 15 V
	Tensão de gatilho desligado: -8 V
	Limiar de tensão alta: 9 V
	Limiar de tensão baixa: 6,3 V

Fonte: (SUPPLIER).

A alimentação do *gate driver* foi obtida através de uma fonte de alimentação isolada pelo modelo DS320-08A da *Supplier*[®], a fonte utilizada, juntamente com suas principais características é informada na Tabela 5.3.


Tabela 5.3 – Placa da fonte de alimentação do *gate driver*.

	Tensão de alimentação: 15 V
	Tensão de isolamento entre primário e secundário: 1500 V
	Proteção contra curto-circuito: fusível 750 mA
	Proteção de sobretensão: diodo zener de 18 V
	Temperatura de operação: 85 °C
	Transformador de pulso: utilizado em conjunto com a fonte para alimentar até dois drivers

Fonte: (SUPPLIER).

O microprocessador utilizado na implementação do controle digital utilizado no protótipo foi o DSP TMS320F28335 da *Texas Instruments*[®], a Tabela 5.4 mostra o microprocessador utilizado e suas principais características.

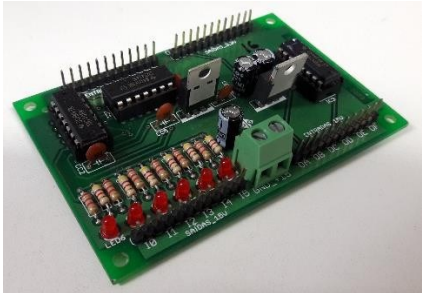
Tabela 5.4 – Placa DSP TMS320F28335 da *Texas Instruments*[®].

	Conversor analógico / digital (A/D)
	Arquitetura de ponto flutuante de 32 bits
	Frequência de <i>clock</i> de 150 MHz
	Memória flash: 512 kB
	Memória RAM: 68 kB
	176 pinos de entrada / saída de propósito geral

Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS).

A tensão de trabalho desse microprocessador ocorre na faixa de 0 a 3,3V e o acionamento de gatilho dos interruptores é feito na faixa de 0 a 15V. Desta forma, uma placa de conversão de níveis de tensão foi utilizada para se adequar esses sinais de 0 — 3,3V para 0 — 15V. Essa placa de conversão e suas particularidades são apresentadas na Tabela 5.5.


Tabela 5.5 – Especificações da placa de conversão de sinais de 3,3 V para 15 V.

	Conversão 3,3 V ↔ 15 V
	6 entradas 3,3 V / 6 entradas 15 V
	6 saídas 3,3 V / 6 saídas 15 V

Fonte: Dados do próprio autor.

A aquisição dos sinais de corrente e tensão do protótipo, seja para controle ou para proteção do sistema, foi realizada através de uma placa de aquisição de sinais que possibilitou a conexão dos mesmos às entradas A/D (analógico – digital) do microprocessador utilizado. A Tabela 5.6 apresenta a placa de aquisição utilizada juntamente com suas características.

Tabela 5.6 – Módulo para aquisição e condicionamento de sinais de tensão e corrente

	Tensão de alimentação	± 12 V
	Máxima corrente eficaz de medição	50 A
	Faixa de medição de corrente	- 70 A a + 70 A
	Máxima tensão eficaz de medição	500 V
	Faixa de medição de tensão	- 500 V a + 500 V
	Faixa de tensão do sinal de saída	0 a 3,3 V
	Nível de <i>offset</i>	1,5 V

Fonte: (Rodrigues, 2016).

No protótipo ainda foram utilizados disjuntores e fusíveis para proteção contra curto circuito e sobrecargas elétricas. Também foram utilizados *coolers* e dissipadores de calor no intuito de maximizar a troca de calor entre os diodos e interruptores com o ar, contendo a deterioração excessiva e aumentando a vida útil dos mesmos. Para a alimentação da fonte de alimentação DS320-08A da *Supplier*[®], o módulo de conversão,

a placa de aquisição e os *coolers* foram utilizados circuitos auxiliares com saídas reguladas em +15V e -15V.

5.3.2. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DAS COMPONENTES DO VENTO NO PROTÓTIPO

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais para cada componente do vento separadamente, bem como suas combinações. Esses mesmos sinais já foram obtidos em simulações computacionais, como já foi mencionado, e agora os mesmos sinais serão mostrados de acordo com a velocidade do eixo do motor.

Para que as componentes do vento pudessem ser emuladas a partir da rotação no eixo do motor CC, o controle de velocidade do mesmo deveria estar em perfeita sintonia entre a interface computacional e a máquina rotativa. Essa sintonia ocorre quando a leitura de velocidade no eixo da máquina é interpretada de maneira correta pelo sistema de controle, que por sua vez executará os comandos necessários para que a referência de velocidade seja alcançada.

Como a primeira tentativa para a leitura de velocidade do motor não foi bem-sucedida, como é mostrado no Apêndice B, optou-se por realizar a avaliação da velocidade de uma maneira indireta.

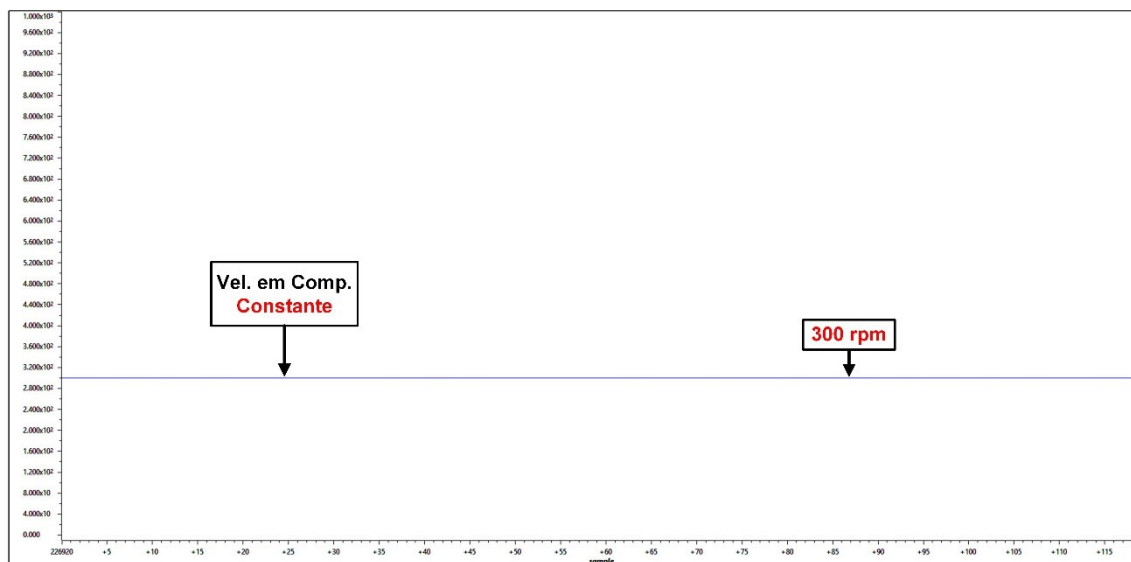
A máquina CC possui seu enrolamento de campo alimentado com tensão constante. Assim, quanto mais tensão aplicada em seu circuito de armadura maior será a velocidade de rotação em seu eixo. Explorando essa característica foi utilizado uma segunda placa de aquisição de sinais de tensão e corrente, para que a tensão na armadura pudesse ser mensurada e consequentemente controlada. Como a tensão na armadura é proporcional a velocidade de rotação da máquina, elaborou-se uma lógica de controle que pudesse relacionar tais características impondo o funcionamento desejado da mesma no protótipo. Esse controle foi elaborado a partir de testes práticos mensurando a velocidade de rotação do motor a partir de um tacômetro para vários valores de tensão aplicados na armadura do motor variando de 0V até a tensão nominal de 180V elaborando assim uma função matemática que relacionasse as duas grandezas. Esse tipo de controle é dito indireto, pois o controle de velocidade da máquina CC está sendo realizado a partir de uma grandeza não desejada diretamente. Desta forma, o controle

está sendo feito na tensão de armadura e consequentemente influenciando a velocidade de rotação da máquina sem nenhum controle aplicado na mensuração da velocidade diretamente. Logo, controlando a tensão de armadura, indiretamente controlou-se a velocidade da máquina.

Com o controle do motor funcionando da forma desejada, as componentes do vento puderam ser emuladas no mesmo. Para que cada componente do vento pudesse ser refletida no funcionamento do protótipo, cada sinal referente ao vento foi convertido em sinal de velocidade de rotação da máquina, que está diretamente relacionado a um valor de tensão aplicado à sua armadura.

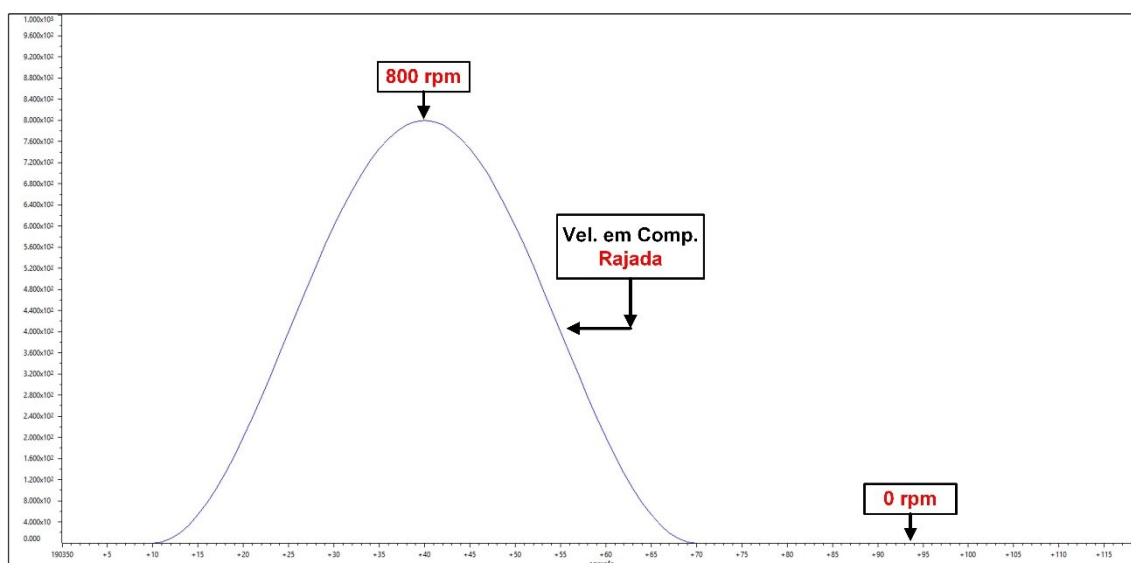
Para demonstrar o funcionamento do motor, com os sinais de vento como referência, era necessário um dispositivo que medisse a velocidade e que a exibisse em forma de gráfico. Como não se tinha posse de um dispositivo que realizasse tal função, os resultados da velocidade do motor foram apresentados com o auxílio da ferramenta *graph* do software *Code Composer*. Desta forma os resultados referentes a cada componente do vento são mostrados nas Figuras 5.17 a 5.20.

Figura 5.17 – Componente constante do vento visto pelo motor.



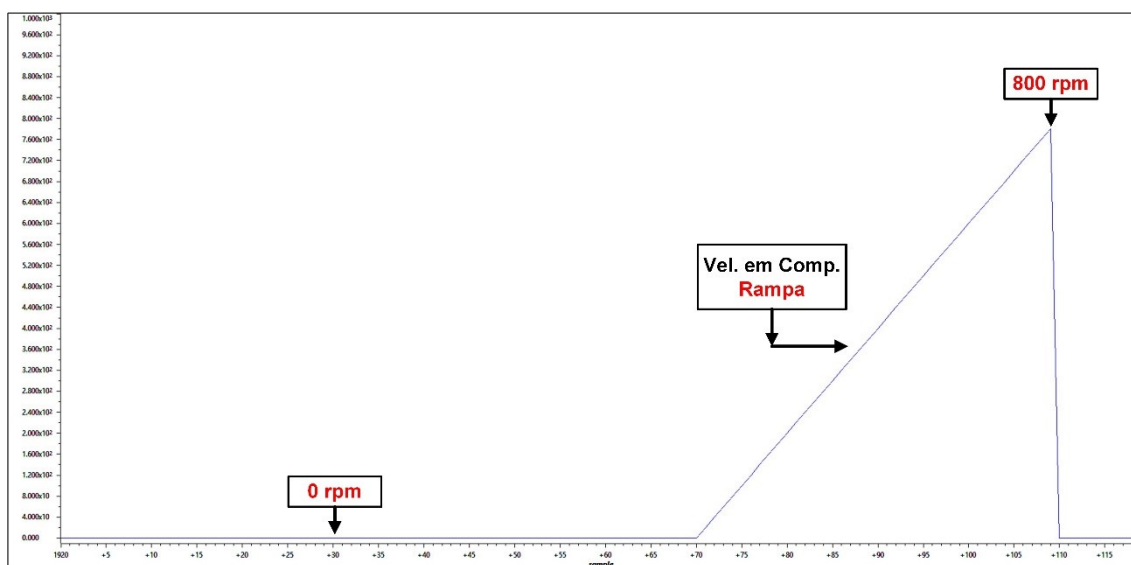
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.18 – Componente rajada do vento visto pelo motor.



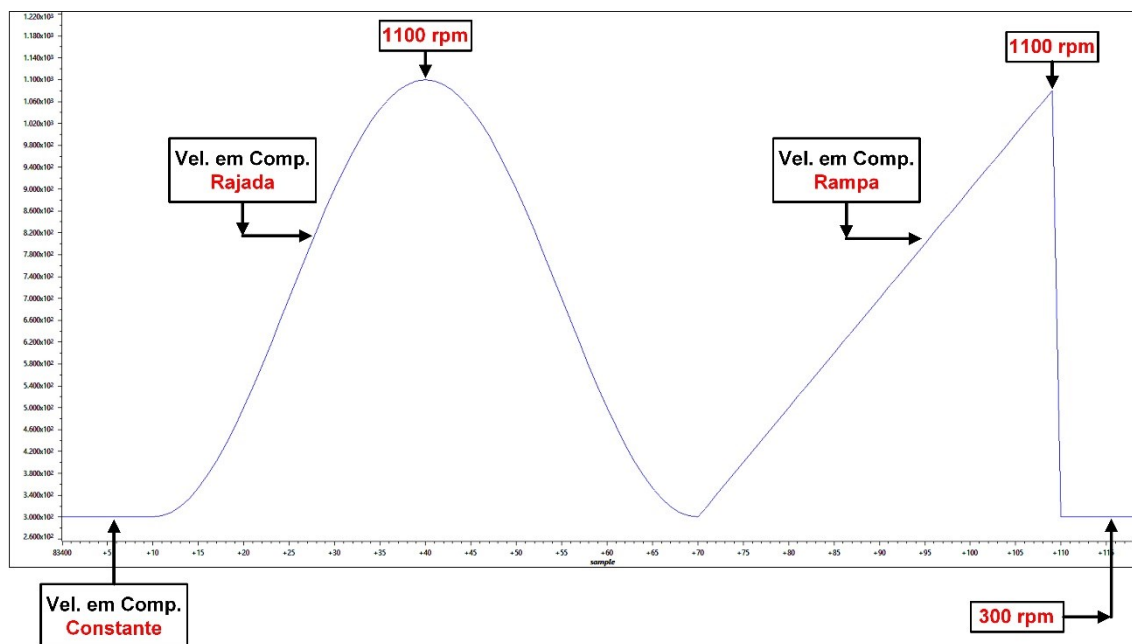
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.19 – Componente rampa do vento visto pelo motor.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.20 – Componentes constante, rajada e rampa vistos pelo motor.



Fonte: Dados do próprio autor.

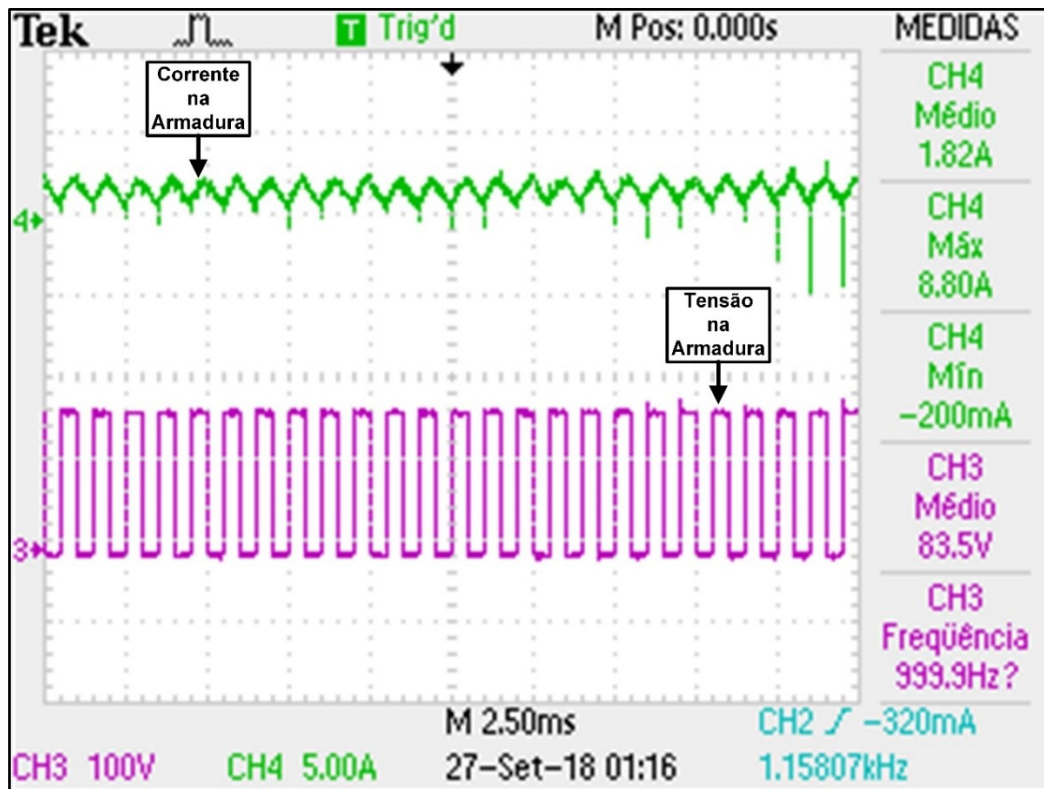
Além dessas três componentes principais, o vento ainda possui a componente de ruído, porém, essa componente não pôde ser identificada no funcionamento do motor na prática. Isso ocorreu porque os níveis de ruídos ocorrem de maneira rápida e aleatória. Como o motor possui um momento de inércia relativamente grande comparado a mudança de cada nível de ruído, as mudanças de alimentação na armadura da máquina eram muito rápidas. Com isso, enquanto o motor ainda processava e realizava o movimento de rotação referente ao primeiro nível, o comando de alimentação da máquina já estava três a quatro pontos de ruídos a frente. Analisando o comportamento do motor, percebeu-se que a alimentação da armadura do motor estava muito rápida em comparação com a resposta do seu movimento de rotação. Assim, diminuiu-se essa velocidade de alimentação. Desta forma, o nível de ruído foi notado pelo motor, mas isso acarretou muita vibração em sua estrutura. Esses níveis mais altos de tensão poderiam acarretar danos mais sérios no motor. Como o intuito do trabalho não era proporcionar o controle fiel de todas as componentes do vento emuladas no motor CC, a componente ruído foi descartada para análises de processamento de energia no sistema.

5.3.3. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL NA MÁQUINA CC

O motor CC e o gerador trifásico foram alimentados a partir de 3 fontes, onde, duas delas sendo fontes CC com variação de 0 a 300V e a outra um varivolt monofásico ligado em série com um retificador monofásico.

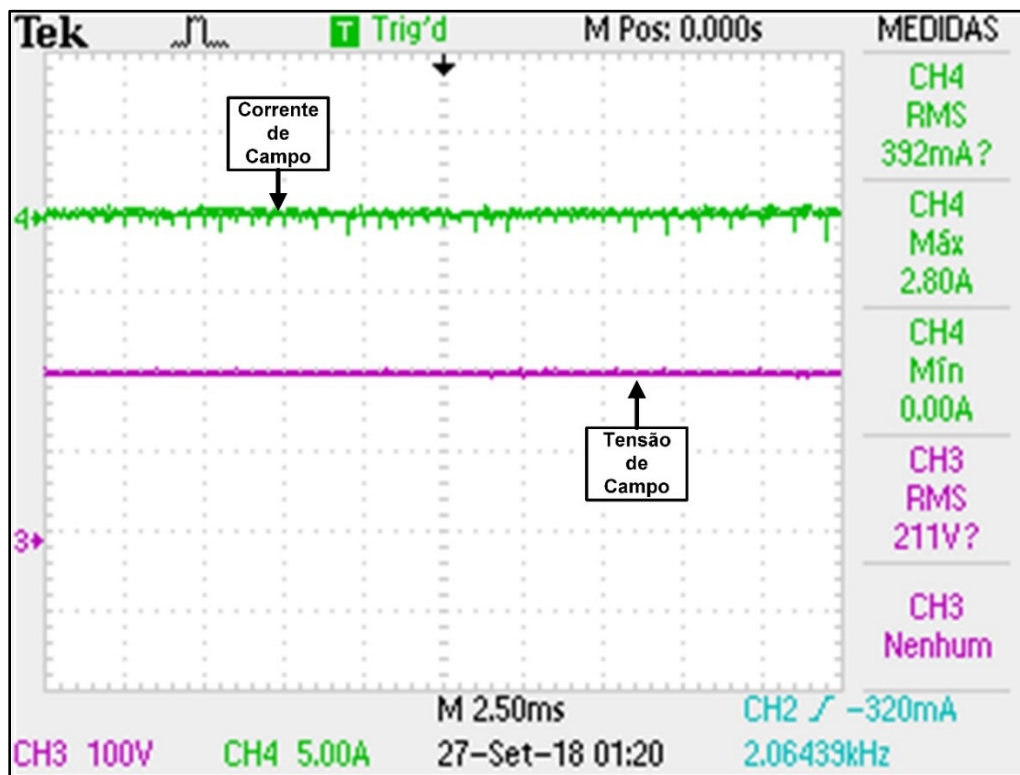
Uma das fontes CC foi destinada a alimentação da armadura do motor, que por sua vez, foi controlada a partir do circuito do *chopper* escolhido. A fonte foi parametrizada em uma tensão de 180V e toda a energia entregue a armadura do motor foi controlada pelo *chopper*. A outra fonte foi destinada a alimentação do circuito de campo do motor e também foi fixada numa tensão de 180V. As tensões vistas na armadura e no campo do motor CC são apresentadas nas Figuras 5.21 e 5.22.

Figura 5.21 – Tensão vista na armadura do motor CC.



Fonte: Dados do próprio autor.

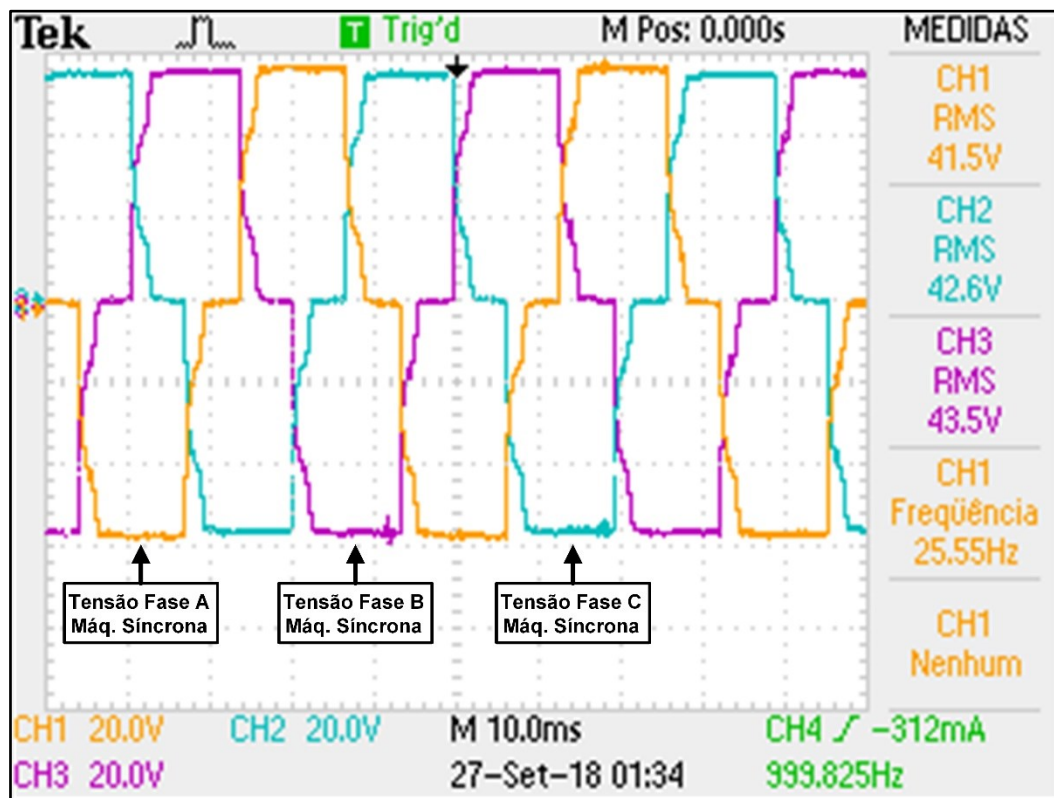
Figura 5.22– Tensão no circuito de campo do motor CC.



Fonte: Dados do próprio autor.

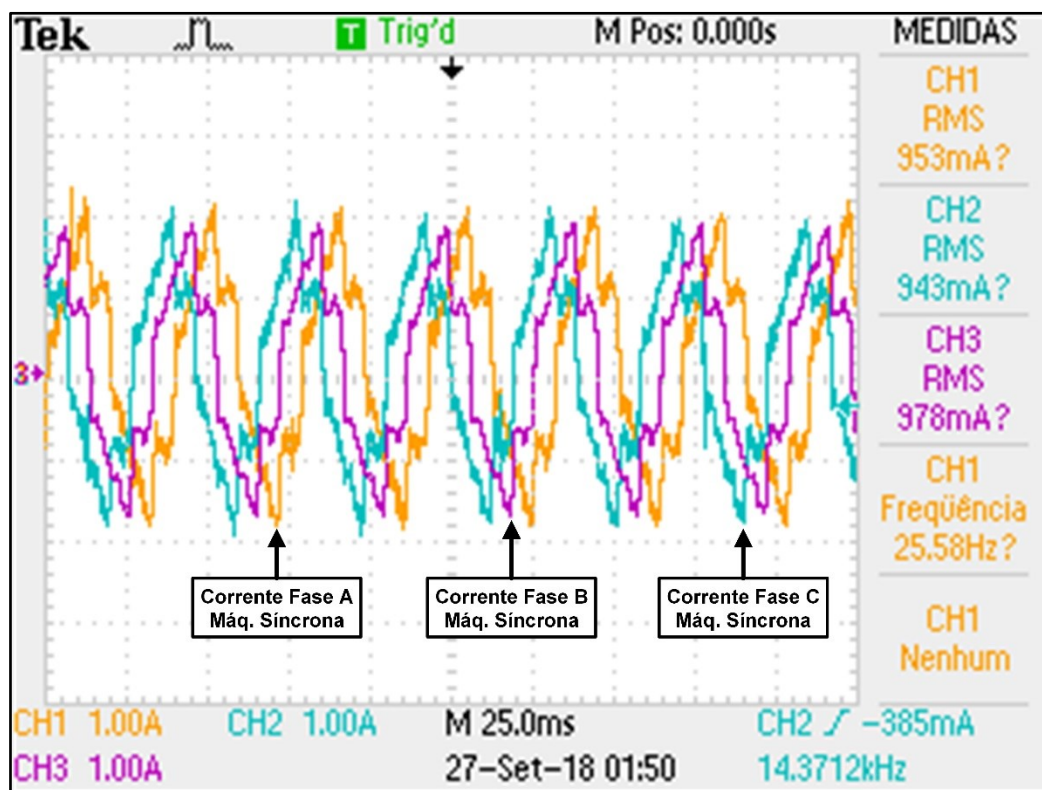
Como o gerador síncrono necessitava de uma alimentação constante em seu circuito de campo, foi escolhido um varivolt monofásico ligado em série com um retificador, também monofásico, e fixando em uma tensão de 12 V. Essa alimentação do gerador trifásico também se manteve constante durante todo o processo de extração de resultados. As tensões e correntes trifásicas geradas são mostradas nas Figuras 5.23 e 5.24.

Figura 5.23 – Tensões trifásicas na saída da máquina síncrona.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 5.24 – Correntes trifásicas na saída da máquina síncrona.



Fonte: Dados do próprio autor.

Analisando as Figuras 5.23 e 5.24 percebe-se que as tensões e correntes geradas pelo gerador trifásico possuem a presença de harmônicos. Esses harmônicos aparecem principalmente pelo fato do motor CC não estar funcionando em sua velocidade nominal e pela dimensão da máquina síncrona utilizada. O motor não foi controlado em sua velocidade nominal por motivos de segurança de construção do protótipo, provocando a geração de tensões com amplitudes menores. Por se tratar de um gerador de pequeno porte e não tão robusto, proporcionou o aparecimento de vibrações mecânicas que afetaram o funcionamento do mesmo.

As distorções nas formas de onda das tensões e correntes geradas, especificadas nas Figuras 5.23 e 5.24, são consequência da imposição de um valor específico da tensão de linha, na máquina síncrona, pelo conversor *Boost*. Essa determinação em um valor específico de tensão ou corrente pelo conversor, bloqueia a geração dessas grandezas na máquina síncrona ocasionando suas deformações (TIBOLA, 2009).

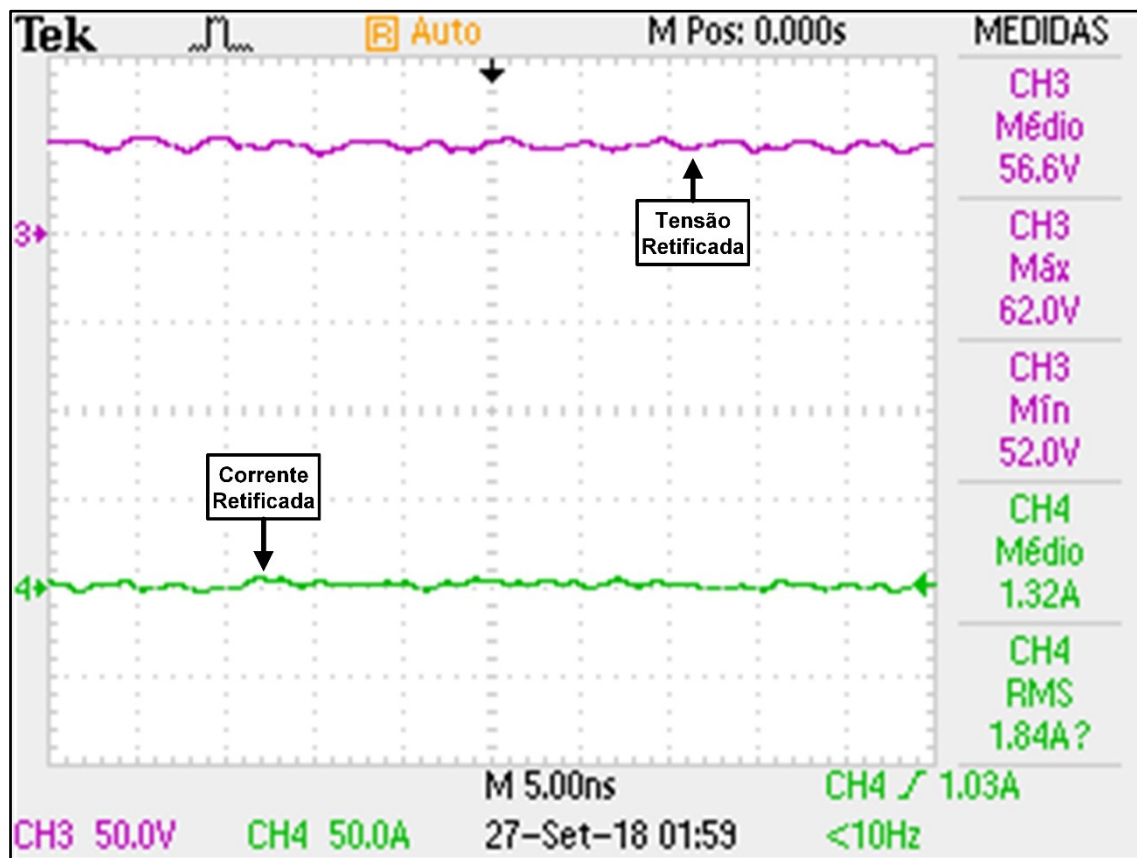
O conteúdo harmônico existente nessa etapa de operação não foi preocupante pelo fato de que nos próximos estágios de funcionamento do protótipo ocorre a retificação das tensões e correntes geradas e ainda possuir um conversor *Boost* cascadeado, este responsável pelo controle da potência extraída do sistema. Mesmo as componentes geradas possuindo conteúdos harmônicos consideráveis, isso não afetou o funcionamento do protótipo.

Do ponto de vista da eletrônica de potência o aumento do conteúdo harmônico não interferiria pelo fato de haver outros estágios para o processamento da energia, porém, do ponto de vista da máquina síncrona, o aumento do conteúdo harmônico de corrente pode acarretar maiores valores eficazes de corrente, atribuindo assim, aquecimento na máquina e interferindo em seu funcionamento.

5.3.4. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO RETIFICADOR TRIFÁSICO

O retificador trifásico utilizado forneceu como resultados a tensão e corrente mostradas na Figura 5.25.

Figura 5.25 – Ondas de tensão e corrente na saída do retificador trifásico.

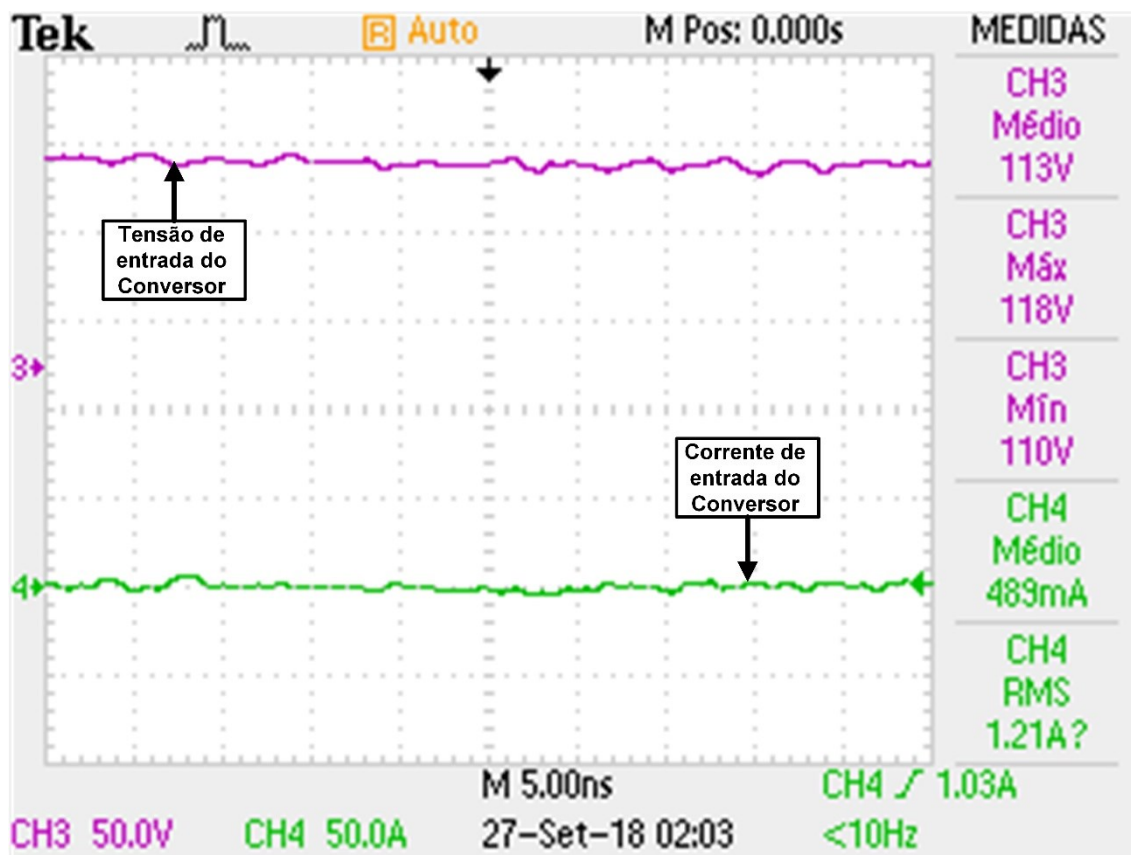


Fonte: Dados do próprio autor.

Os níveis de tensão e corrente fornecidos na saída do retificador trifásico estão dentro dos níveis desejados para a comprovação do funcionamento do protótipo. Como o retificador utilizado não possui nenhum tipo de controle, toda componente de tensão e corrente inserida em sua entrada é retificada de maneira direta seguindo o funcionamento dos diodos utilizados.

5.3.5. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONVERSOR BOOST

A tensão e corrente na entrada do conversor boost utilizado estão demonstrados na Figura 5.26.

Figura 5.26 – Tensão e corrente na entrada do conversor *boost*.


Fonte: Dados do próprio autor.

Verificando a Figura 5.26, os níveis de tensão e corrente se encontram estáveis para o funcionamento do protótipo. Mesmo com um conteúdo harmônico considerável o sistema conseguiu fornecer níveis de tensão e corrente com poucas variações, validando assim, o funcionamento do motor e consequentemente do protótipo.

A utilização de um indutor e do banco capacitivo relativamente grandes na entrada do protótipo do conversor filtrou grande parte das distorções de correntes e tensão existentes na saída do gerador trifásico. Mesmo tornando o boost um pouco mais lento para as respostas do controle, os pequenos atrasos não interferiram no funcionamento do protótipo.

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os principais resultados de cada etapa de operação do protótipo. Foram analisadas a geração de energia, sua retificação e a extração de máxima potência do protótipo. A geração foi realizada pelo conjunto de

máquinas CC e gerador trifásico, a retificação pelo retificador trifásico e a extração da potência pelo conversor boost.

Na etapa de geração de energia mostrou-se os principais tipos de ventos que foram os sinais de entrada do motor CC, responsável por emular de maneira correta o comportamento de uma turbina eólica. Foram apresentados o comportamento do motor para cada tipo de vento e os sinais de tensão e corrente trifásicos na saída do gerador trifásico.

Na fase retificadora os sinais de tensões e correntes trifásicas foram convertidos em sinais contínuos. Estabeleceu-se um valor que não danificasse o protótipo para comprovar seu funcionamento.

No estágio de extração de máxima potência os resultados de simulação comprovaram o funcionamento do algoritmo utilizado. Já os resultados experimentais dessa etapa mostraram o funcionamento do sistema sem as variações de velocidade provocadas pelas componentes do vento. O conversor teve bom desempenho para as variações de tensão e corrente gerados na estratégia de emular o comportamento dos aerogeradores.

6. CONCLUSÕES GERAIS

No objetivo de sintetizar a pesquisa desenvolvida, os resultados experimentais e práticos obtidos e as contribuições que o trabalho veio apresentar, mostra-se uma avaliação conclusiva nesse capítulo.

Desta forma, apresentou-se uma estrutura que emulou o comportamento de um aerogerador de pequeno porte, a partir do controle de velocidade de um motor CC. O protótipo foi composto por um motor CC e uma máquina síncrona trifásica utilizada como gerador, que foram responsáveis pela geração de energia do sistema.

As máquinas do sistema foram interligadas ao retificador trifásico e ao conversor *boost*. Esses componentes foram responsáveis por estabelecer um nível contínuo de energia e por extrair a máxima potência existente no sistema, respectivamente.

O manuseio dos componentes existentes na estrutura montada de uma forma individual é facilmente encontrado nas pesquisas sobre energia eólica, porém, a aplicação deles em um mesmo protótipo os torna simples e práticos no estudo dos aerogeradores de pequeno porte. A utilização do motor com alimentação de campo fixo e independente, a máquina síncrona empregada como gerador, também com alimentação de campo fixo e independente, e o uso do conversor *boost*, no processamento de energia, controlando sua corrente de entrada juntamente com um algoritmo MPPT de P&O foram características unidas em uma estrutura que forneceram bons resultados para a interpretação do processamento da energia provida da força dos ventos.

Para comprovação das análises realizadas na parte teórica da pesquisa construiu-se um protótipo com potência nominal de 1kW objetivando ensaios laboratoriais. Após os resultados alcançados, notou-se que a geração de energia a partir de máquinas de pequeno porte sofre muita interferência de ruídos e vibrações ocasionadas no seu funcionamento. Essas interferências são notadas nas ondas de tensão e corrente fornecidas pelo gerador trifásico a partir do aparecimento de conteúdo harmônico de pequenas ordens. Outro fato interessante, percebido nos resultados, foi que o processamento de energia feito pelo conversor CC – CC não sofreu interferências pelas distorções ocorridas nas etapas anteriores de funcionamento. Percebe-se que a utilização de um banco capacitivo juntamente com um indutor relativamente grande na entrada do conversor, filtrou grande parte das distorções que pudessem interferir no funcionamento do sistema, mesmo isso tornando as respostas do conversor mais lentas para as alterações do controle

aplicadas. Vale ressaltar que a ordem dos componentes não prejudicou o funcionamento desejado do protótipo.

Desta forma, diante os resultados apresentados, o protótipo construído pode representar de forma satisfatória os principais distúrbios ocorridos no processo de geração da energia eólica. A representação desses distúrbios em pequena escala pode facilitar a compreensão e desenvolvimento de novas técnicas para o aprimoramento da geração desse tipo de energia. Mesmo as limitações impostas por componentes que não apresentam comportamento desejado, por motivos de construção ou por agentes externos, a representação em escala laboratorial é uma das melhores formas de se aprimorar técnicas de controle ou de construção de aerogeradores.

Como sugestão, para trabalhos futuros, destaca-se a investigação da utilização de algum sensor de velocidade para o motor CC, permitindo um ajuste fino no controle de velocidade do motor, deixando o sistema mais perceptível a pequenas variações ocasionadas por mudanças na intensidade ou direção dos ventos. Outra sugestão seria testar conjuntos de máquinas diferentes, tanto motor quanto gerador, no intuito de conseguir resultados mais precisos com menos distorções harmônicas, melhorando a qualidade da energia produzida. A implementação de um sistema na configuração DFIG tornaria possível a construção de um protótipo com potência mais elevada com recursos financeiros mais baixos. A utilização de um retificador semi ou totalmente controlado, no intuito de melhorar o processamento da energia para níveis com maior rendimento e menores distorções, também é uma sugestão de aprimoramento do atual trabalho.

Desta forma, destaca-se a continuação e aprofundamento dos estudos relacionados aos elementos que foram responsáveis pela construção do emulador eólico, dos conversores de potência que atuam no processamento de energias renováveis e por fim, a rede elétrica, no intuito de aperfeiçoar a matriz energética do país para um sistema mais renovável.

REFERÊNCIAS

ABEEólica. (1 de Fevereiro de 2019). abeeolica.org.br. Fonte: ABEEólica: <http://abeeolica.org.br/>

ALVARENGA, E. B. (2012). Uma proposta laboratorial para estudos de desempenho de unidades eólicas no contexto da qualidade de energia. *Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Uberlândia*. Uberlândia, MG, Brasil.

ANDERSON, P. M., & BOSE, A. (Dezembro de 1983). Stability simulation of wind turbine systems. *Publicação de revista*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1983.317873>.

BARROS, C. M. (2011). Avaliação de um regulador linear quadrático aplicado em dfigs. *Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA*. Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.

BARROS, L. S. (2006). Uma Estratégia de Controle para o Melhoramento do Comportamento Dinâmico de Máquinas de Indução Duplamente Alimentadas Operando como Geradores. *Tese de Doutorado*. Campina Grande, Paraíba, Brasil.

CASADOSVENTOS. (Novembro de 2017). *Casa dos Ventos*. Fonte: Site da Casa dos Ventos: <http://casadosventos.com.br>

CATIAO, N. D. (2011). Dynamic modelling and control of fully rated converter wind turbines. *Renewable Energy*, 2287-2297. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.12.025>.

DORF, R. C., & BISHOP, R. H. (2001). *Sistemas de Controle Modernos*. Rio de Janeiro: LTC.

ERICKSON, R. W., & MAKSIMOVIC, D. (2004). *Fundamentals of Power Eletronics*. New York, EUA: Kluwer Academic Puclishers.

FRANCISCO, C. M. (18 de Dezembro de 2012). Green Energy - Produção de Energia Elétrica a partir de Fontes de Energia Renovável para Sistemas de Microprodução. Funchal, Ilha da Madeira, Portugal.

HAU, & E. (2006). *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*. Springer.

- JÚNIOR, C. J. (2017). Uma Contribuição ao Estudo e Desenvolvimento de Inversores com Solares com duas Entradas de MPPT Independentes e Capacidade de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Condição de Sombreamento Parcial. *Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal de Uberlândia - UFU*. Uberlândia, MG, Brasil.
- LAVILL. (Dezembro de 2017). *LAVILL*. Fonte: Site da Lavill : <http://www.lavill.com.br>
- MAIRINCK, I. B. (Julho de 2014). Investigação, simulação e Diagnóstico sobre o controle de acionamento de uma bobinadeira de aço inoxidável. *Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG*. Belo Horizonte, MG, Brasil.
- OGATA, K. (2011). *Engenharia de Controle Moderno*. 5^a. ed. Pearson Education - Br.
- PATENÉ, E. J. (2008). Implementação de controle de velocidade em malha fechada para motores de corrente contínua utilizando sistema de aquisição de dados. *Dissertação de mestrado do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia*. São Caetano do Sul, SP, Brasil.
- REIS, J. M. (Outubro de 2013). Comportamento dos Geradores Eólicos Síncronos com Conversores Diante de Curto-Circuitos no Sistema. *Dissertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- REN21. (Novembro de 2017). *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*. Fonte: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century: <http://www.ren21.net>
- RIBEIRO, R. V. (2011). Sistema Fotovoltaico Autônomo Baseado em Conversores CC-CC Boost. *Disertação de Mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Rodrigues, D. B. (2016). *Retificador Híbrido Trifásico com Fator de Potência unitário, alta densidade de potência e ampla faixa de regulação de tensão no barramento em corrente contínua para Conexão em Microrredes CC*. Uberlândia: Tese de Doutorado, edUFU.
- SHAFIEI, F. (2012). Modelling and verification of doubly fed induction generator (DEFIG) using real time digital simulator (RTDS). *Tese de Doutorado*. Göteborg, Sweden.

SHRIKANT S MALI, B. E. (2013). MPPT Algorithms: Extracting Maximum Power from Wind Turbines. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING*.

SILVA, F. B. (Março de 2015). Atenuação do afundamento de tensão em geradores síncronos isolados quando submetidos a partida direta de motores de indução. *Dissertação de mestrado da Universidade Federal de Uberlândia - UFU*. Uberlândia, MG, Brasil.

TAVEIROS, F. E. (Maio de 2014). Sistema de Conversão de Energia Eólica Baseado no Gerador de Indução Duplamente Alimentado: Análise e Contribuição ao Controle da Máquina. *Dissertação de Mestrado*. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

TIBOLA, G. (Março de 2009). Sistema Eólico de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência. *Dissertação de Mestrado Submetida a Universidade Federal de Santa Catarina*. Florianópolis, SC, Brasil.

VILELA, A. O. (2011). Projeto e Construção de um Conversor Boost Controlado em Modo de Tensão. *Monografia apresentada para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Viçosa - UFV*. Viçosa, MG, Brasil.

WU, B. Y. (2011). Power conversion and control of wind energy systems. *IEEE Press series on power engineering*. <https://doi.org/10.1002/9781118029008>.

PUBLICAÇÃO DOS AUTORES ASSOCIADOS À PESQUISA

Dentro do período contemplado pela presente pesquisa foi realizado uma publicação em um evento de reconhecida relevância:

ARTIGO PUBLICADO EM CONFERÊNCIA REGIONAL:

➤ **COSTA, D.L.M.; SOARES, M.B.; LIMA, G.B.; FREITAS, L.C.G.** *Validação do Controle de um Motor de Corrente Contínua para Simulação de uma Turbina Eólica em Escala Laboratorial*. In: Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, XIII CEEL, 2016. Uberlândia – MG.



APÊNCIDE A – CÓDIGO EMBARCADO NO DSP320F28335 PARA CONTROLE DO PROTÓTIPO

```

/*****
****
// This code is created by SimCoder Version 9.1 for TI F28335 Hardware Target
//
// SimCoder is copyright by Powersim Inc., 2009-2011
//
// Date: August 31, 2018 12:57:19
*****/
#include <math.h>
#include "PS_bios.h"
typedef float DefaultType;
#define GetCurTime() PS_GetSysTimer()

interrupt void Task();
interrupt void Task_1();
interrupt void Task_2();

DefaultType fGblControl_Digital = 0.0;
DefaultType fGblCh_Chopper = 0.0;
DefaultType fGblCh_Boost = 0.0;
DefaultType fGblControl_Digital_1 = 0.0;

//*****Condições para testes*****

int inicia_chaves = 0;
int reseta_chaves = 0;
int inicia_leitura_armadura = 0;
int inicia_motor = 0;
int sentido_motor = 0;
int inicia_vento = 0;
int inicia_boost = 0;
int cat_vento = 0;
float controle_ch_M = 0;
float controle_ch_B = 0;

//*****Variáveis do controle de Velocidade do Motor CC*****

//k = 0.0001    T = 0.00001    k = k    B1 e A1 = T    B0 = 1    A0 = 0

float Vel_ref = 0;
float b0p = 0.0001;
float b1p = -0.0000999;
float a1p = -1;
float erro_Vel = 0;
float erro_Vel_ant= 0;
float Kvel = 0;
float Kvel_ant = 0;
float teste_motor = 0;

//*****Variáveis do controle de Velocidade do Motor CC*****

float Varm_ant2 = 0;
float Varm_ant1 = 0;
float filter_vel_ant2 = 0;
float filter_vel_ant1 = 0;
float filter_vel = 0;
```




```
float b0 = 3.9132644E-005;
float b1 = 7.8265288E-005;
float b2 = 3.9132644E-005;
float a1 = -1.9824046;
float a2 = 0.98256117;
float Varm = 0;
float Varm_s = 0;
float Varm_f = 0;
float iarm = 0;
float Vel = 0;
float Vel_c = 0;

//*****Variáveis do controle do Vento*****

//*****Variáveis do controle gerais*****

float pi = 3.141592654;
float contador = 0;
float segundos = 0;

//*****Variáveis do controle das Componentes do Vento*****

float Vel_Vento[120] = { 0 };
float Vel_Vento1[120] = { 0 };
float Vel_Vento2[120] = { 0 };
float Vel_Vento3[120] = { 0 };
float Vel_Vento4[120] = { 0 };
float Vel_Vento5[120] = { 0 };
float Vel_Vento6[120] = { 0 };
float Vel_Vento7[120] = { 0 };
float Vel_Vento8[120] = { 0 };
float Vel_Vento9[120] = { 0 };
int i_v = 0; // 1s em 25k é igual a 417 interações //Contador do vetor das
variáveis do vento
int if_v = 120; //referente a 2 segundos
float Var_Vento = 0;
float reseta_cont = 0;

//*****Variáveis do controle da Constatnte do Vento*****

float V_cte[120] = { 0 }; // Aceleração média da máquina, constante

//*****Variáveis do controle da Rajada do Vento*****

float Ti_rj = 10;
float T_rj = 60;
float V_rj[120] = { 0 }; // 1s em 25k é igual a 417 interações
float R_rj_max = 800; // Aceleração máxima da máquina na rajada
float mult_rj = 0;
float mult_rj_ant = 0;
float prod1_rj = 0;
float prod1_rj_ant = 0;
float prod2_rj = 0;
float prod2_rj_ant = 0;
float div1_rj = 0;
float div1_rj_ant = 0;
float div2_rj = 0;
float div2_rj_ant = 0;
float erro_rj = 0;
```

```
float erro_rj_ant = 0;

//*****Variáveis do controle da Rampa do Vento*****

float Ti_rp = 70;
float Tf_rp = 110;
float V_rp[120] = { 0 }; // 1s em 25k é igual a 417 interações
float R_rp_max = 800; // Aceleração máxima d máquina na componente rampa
float mult_rp = 0;
float mult_rp_ant = 0;
float prod_rp = 0;
float prod_rp_ant = 0;
float div_rp = 0;
float div_rp_ant = 0;
float erro1_rp = 0;
float erro1_rp_ant = 0;
float erro2_rp = 0;
float erro2_rp_ant = 0;

//*****Variáveis do controle do Ruídos do Vento*****

float dW = 2;
float Kn = 0.004;
float F = 2000;
float N = 50;
int i = 1;
float Vruido = 0;
float omegai = 0;
float mi = 0.6949;
float expoente = 1.3333;
float numerador1 = 0;
float denominador1 = 0;
float denominador2 = 0;
float Sv = 0;
float V_rd[120] = { 0 }; // 1s em 25k é igual a 417 interações
int fase_fi = 0;
int fi = 0;
int k_ruido = 1000;

//*****Variáveis do controle de MPPT por P&O*****

float iL_ant = 0;
float Delta_iL = 0;
float P = 0;
float P_ant = 0;
float Delta_P = 0;
float iL_ref_MPPT = 0.3;
float incremento = 0.1;

//*****Variáveis do controle do Conversor Boost*****

float Vret_ant2 = 0;
float Vret_ant1 = 0;
float filter_vret_ant2 = 0;
float filter_vret_ant1 = 0;
float filter_vret = 0;
float Vret_f = 0;
float iL_ant2 = 0;
float iL_ant1 = 0;
```



```
float filter_il_ant2 = 0;
float filter_il_ant1 = 0;
float filter_il = 0;
float il_f = 0;
float Vret_sc;
float il_sc;
float Vret;
float il;
float il_ref = 0;
float bo_il = 0.02006;
float b1_il = -0.01994;
float a1_il = -1;
float erro_il = 0;
float erro_il_ant = 0;
float KiL = 0;
float KiL_ant = 0;
float cont_boost = 0;
interrupt void Task()
{
    DefaultType fTI_ADC1, fZOH1, fTI_ADC1_1, fZOH2, fTI_ADC1_2, fZOH3;
    PS_EnableIntr();

    fTI_ADC1 = PS_GetDcAdc(0);
    fTI_ADC1_1 = PS_GetDcAdc(1);
    fTI_ADC1_2 = PS_GetDcAdc(2);
    fZOH1 = fTI_ADC1;
    fZOH2 = fTI_ADC1_1;
    fZOH3 = fTI_ADC1_2;
    {

        fGblControl_Digital = (1 - controle_ch_M);
        fGblControl_Digital_1 = (1 - controle_ch_B);

//*****Declaração de entradas*****

        Varm_s = fZOH1;
        Vret_sc = fZOH2;
        il_sc = fZOH3;

//*****Teste do funcionamento das chaves*****

        if (inicia_chaves == 1)
        {
            controle_ch_M = 0.5;
            controle_ch_B = 0.5;
        }
        if (reseta_chaves == 1)
        {
            controle_ch_M = 0;
            controle_ch_B = 0;
        }

//*****TESTE_FUNCIONAMENTO_DO_MOTOR*****

        if (inicia_motor == 2)
        {
            if (sentido_motor == 1)
            {
                controle_ch_M = teste_motor;
            }
        }
    }
}
```



```
    }
    if (sentido_motor == 0)
    {
        controle_ch_M = 0;
    }
}

//*****Controle de Velocidade do Motor_CC*****

if (inicia_leitura_armadura == 1)
{
    Varm_ant2 = Varm_ant1;
    Varm_ant1 = Varm;
    Varm = ((341.17 * Varm_s) - 499.39) * (-1);
    filter_vel_ant2 = filter_vel_ant1;
    filter_vel_ant1 = filter_vel;
    filter_vel = (b0*Varm) + (b1*Varm_ant1) + (b2*Varm_ant2) -
(a1*filter_vel_ant1) - (a2*filter_vel_ant2);
    Varm_f = (filter_vel*0.988) + 1.5746;
    Vel = (Varm_f * 8.9081) - 35.0775;
}

//*****Controle de Velocidade do Motor_CC*****

if ((inicia_leitura_armadura == 1) && (inicia_motor == 1))
{
    erro_Vel_ant = erro_Vel;
    erro_Vel = Vel_ref - Vel;
    Kvel_ant = Kvel;
    Kvel = (erro_Vel * (b0p)) + (erro_Vel_ant * (b1p)) - (Kvel_ant *
(a1p)) ;

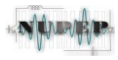
    if (Kvel <= 0)
    {
        Kvel = 0;
    }
    if (Kvel >= 0.95)
    {
        Kvel = 0.95;
    }
    if (Vel_ref == 0)
    {
        Kvel = 0;
    }
}

//*****Chaveamento Chopper*****
    controle_ch_M = Kvel;
}

//*****
//*****Controle das Variáveis do Vento*****
/*if ((inicia_leitura_armadura == 1) && (inicia_vento == 1))
{

    if (segundos == 120)
    {
        segundos = 0;
    }

    contador = contador + 1;
```



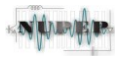
```
if (contador >= 49999)
{
    contador = 0;
    segundos = segundos + 1;
}

if (i_v >= if_v)
{
    i_v = 0;
    omegai = 0;
    Vruido = 0;
}
i_v = segundos;
//*****Componente Constatnte*****
V_cte[i_v] = 300;
//*****Componente Rajada*****
div1_rj_ant = div1_rj;
div1_rj = i_v / T_rj;
div2_rj_ant = div2_rj;
div2_rj = Ti_rj / T_rj;
erro_rj_ant = erro_rj;
erro_rj = div1_rj - div2_rj;
prod1_rj_ant = prod1_rj;
prod1_rj = (1 - cos(erro_rj * 2 * pi));
prod2_rj_ant = prod2_rj;
prod2_rj = R_rj_max * 0.5;
mult_rj_ant = mult_rj;
mult_rj = prod1_rj * prod2_rj;

if ((i_v > Ti_rj) && (i_v < (Ti_rj + T_rj)))
{
    V_rj[i_v] = mult_rj;
}
else
{
    V_rj[i_v] = 0;
}
//*****Componente Rampa*****

erro1_rp_ant = erro1_rp;
erro1_rp = i_v - Tf_rp;
erro2_rp_ant = erro2_rp;
erro2_rp = Ti_rp - Tf_rp;
div_rp_ant = div_rp;
div_rp = erro1_rp / erro2_rp;
prod_rp_ant = prod_rp;
prod_rp = 1 - div_rp;
mult_rp_ant = mult_rp;
mult_rp = R_rp_max * prod_rp;

if ((i_v > Ti_rp) && (i_v < Tf_rp))
{
    V_rp[i_v] = mult_rp;
}
else
{
    V_rp[i_v] = 0;
}
```



```
//*****Componente Ruído*****

    omegai = (i_v + (0.5)) * dw;

    numerador1 = 2 * Kn * F * F * omegai;
    denominador1 = (1 + (((F * omegai) / (3.14159 * mi)) * ((F *
omegai) / (3.14159 * mi)))));
    denominador2 = pow(denominador1, expoente) + 0.001;
    Sv = ((numerador1) / ((pow(3.14159, 2)) * denominador2));
    fi = 2 * pi;
    fase_fi = rand() % fi;

    Vruído = Vruído + (pow((Sv * dw), 0.5)) * cos((omegai * i_v) +
(fase_fi));

    V_rd[i_v] = (2 * Vruído) * k_ruído;

//*****Componentes do Vento*****

    Vel_Vento1[i_v] = V_cte[i_v] + V_rj[i_v];
    Vel_Vento2[i_v] = V_cte[i_v] + V_rp[i_v];
    Vel_Vento3[i_v] = V_cte[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento4[i_v] = V_rj[i_v] + V_rp[i_v];
    Vel_Vento5[i_v] = V_rj[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento6[i_v] = V_rp[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento7[i_v] = V_cte[i_v] + V_rj[i_v] + V_rp[i_v];
    Vel_Vento8[i_v] = V_cte[i_v] + V_rj[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento9[i_v] = V_rj[i_v] + V_rp[i_v] + V_rd[i_v];
    Vel_Vento[i_v] = V_cte[i_v] + V_rj[i_v] + V_rp[i_v] + V_rd[i_v];

    Var_Vento = V_rp[i_v];
    i_v = i_v + 1;
    if (reseta_cont == 1)
    {
        i_v = 0;
        segundos = 0;
    }

//*****Controle de Velocidade do Motor CC*****

    if (cat_vento == 0)
    {
        Vel_ref = 0;
    }
    if (cat_vento == 1)
    {
        Vel_ref = V_cte[i_v];
    }
    if (cat_vento == 2)
    {
```

```
        Vel_ref = V_rj[i_v];
    }
    if (cat_vento == 3)
    {
        Vel_ref = V_rp[i_v];
    }
    if (cat_vento == 4)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento1[i_v];
    }
    if (cat_vento == 5)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento2[i_v];
    }
    if (cat_vento == 6)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento3[i_v];
    }
    if (cat_vento == 7)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento4[i_v];
    }
    if (cat_vento == 8)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento5[i_v];
    }
    if (cat_vento == 9)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento6[i_v];
    }
    if (cat_vento == 10)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento7[i_v];
    }
    if (cat_vento == 11)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento8[i_v];
    }
    if (cat_vento == 12)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento9[i_v];
    }
    if (cat_vento == 13)
    {
        Vel_ref = Vel_Vento[i_v];
    }
    erro_Vel_ant = erro_Vel;
    erro_Vel = Vel_ref - Vel;
    Kvel_ant = Kvel;
    Kvel = (erro_Vel * (b0p)) + (erro_Vel_ant * (b1p)) - (Kvel_ant
* (a1p)) ;
    if (Kvel <= 0)
    {
        Kvel = 0;
    }
    if (Kvel >= 0.95)
    {
        Kvel = 0.95;
    }
}
```



```
        if (Vel_ref == 0)
        {
            Kvel = 0;
        }

//*****Chaveamento Chopper*****

        controle_ch_M = Kvel;
    }*/

//*****
//*****MPPT com controle de Corrente por P&O*****

    if (inicia_boost == 1)
    {
        Vret_ant2 = Vret_ant1;
        Vret_ant1 = Vret;
        Vret = ((-274.82) * Vret_sc) + 408,12;
        filter_vret_ant2 = filter_vret_ant1;
        filter_vret_ant1 = filter_vret;
        filter_vret = (b0*Vret) + (b1*Vret_ant1) + (b2*Vret_ant2) -
(a1*filter_vret_ant1) - (a2*filter_vret_ant2);
        Vret_f = (filter_vret*0.988) + 1.5746;
        iL_ant2 = iL_ant1;
        iL_ant1 = iL;
        iL = (11.539 * iL_sc) - 17.154;
        filter_iL_ant2 = filter_iL_ant1;
        filter_iL_ant1 = filter_iL;
        filter_iL = (b0*iL) + (b1*iL_ant1) + (b2*iL_ant2) -
(a1*filter_iL_ant1) - (a2*filter_iL_ant2);

        iL_f = filter_iL;
        P = Vret_f * iL_f;
        cont_boost = cont_boost + 1;

        if (cont_boost >= 50000) //50k dividido por 1Hz
        {
            P = Vret_f * iL_f;
            Delta_iL = iL_f - iL_ant;
            Delta_P = P - P_ant;
            if (Delta_P == 0)
            {
                //Retorna;
            }
            else
            {
                if (Delta_P < 0)
                {
                    if (Delta_iL < 0)
                    {
                        iL_ref_MPPT = iL_ref_MPPT + incremento;
                    }
                    else
                    {
                        iL_ref_MPPT = iL_ref_MPPT - incremento;
                    }
                }
            }
            else
            {

```



```
        if (Delta_iL < 0)
        {
            iL_ref_MPPT = iL_ref_MPPT - incremento;
        }
        else
        {
            iL_ref_MPPT = iL_ref_MPPT + incremento;
        }
    }
    iL_ant = iL_f;
    P_ant = P;
    iL_ref = iL_ref_MPPT;

    cont_boost = 0;
}

if (iL_f >= 4.5)
{
    iL_f = 4.5;
}

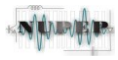
if (iL_ref_MPPT >= 2)
{
    iL_ref_MPPT = 0;
}

//*****Controle de Corrente do Conversor Boost*****

erro_iL_ant = erro_iL;
erro_iL = iL_ref - iL_f;
KiL_ant = KiL;
KiL = KiL_ant + (bo_iL * erro_iL) + (b1_iL * erro_iL_ant);
if (KiL <= 0)
{
    KiL = 0;
}
if (KiL >= 0.95)
{
    KiL = 0.95;
}

//*****Chaveamento do Conversor Boost*****

    controle_ch_B = KiL;
}
}
#endif_DEBUG
fGblCh_Chopper = fGblControl_Digital;
#endif
#endif_DEBUG
fGblCh_Boost = fGblControl_Digital_1;
#endif
PS_ExitTimer1Intr();
}
interrupt void Task_1()
{
    PS_EnableIntr();
    PS_SetPwm2Rate(fGblControl_Digital_1);
```



```
    PS_ExitPwm2General();
}

interrupt void Task_2()
{
    PS_EnableIntr();
    PS_SetPwm1Rate(fGblControl_Digital);
    PS_ExitPwm1General();
}

void Initialize(void)
{
    PS_SysInit(30, 10);
    PS_StartStopPwmClock(0);
    PS_InitTimer(0, 0xffffffff);
    PS_InitPwm(1, 0, 1000*1, 0*1e6, PWM_POSI_ONLY, 28386);    // pwnNo,
    waveType, frequency, deadtime, outtype
    PS_SetPwmPeakOffset(1, 1, 0, 1.0/1);
    PS_SetPwmIntrType(1, ePwmNoAdc, 1, 0);
    PS_SetPwmVector(1, ePwmNoAdc, Task_2);
    PS_SetPwm1Rate(0);
    PS_StartPwm(1);

    PS_InitPwm(2, 0, 2500*1, 0*1e6, PWM_POSI_ONLY, 11840);    // pwnNo,
    waveType, frequency, deadtime, outtype
    PS_SetPwmPeakOffset(2, 1, 0, 1.0/1);
    PS_SetPwmIntrType(2, ePwmNoAdc, 1, 0);
    PS_SetPwmVector(2, ePwmNoAdc, Task_1);
    PS_SetPwm2Rate(0);
    PS_StartPwm(2);

    PS_ResetAdcConvSeq();
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 0, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 1, 1.0);
    PS_SetAdcConvSeq(eAdcCascade, 2, 1.0);
    PS_AdcInit(0, !0);

    PS_InitTimer(1,20);
    PS_SetTimerIntrVector(1, Task);
    PS_StartStopPwmClock(1);
}

void main()
{
    Initialize();
    PS_EnableIntr();    // Enable Global interrupt INTM
    PS_EnableDbgm();
    for (;;) {}
}
```

APÊNDICE B – ADVERSIDADES NO USO DO ENCODER INCREMENTAL DYNAPAR B58N

Inicialmente a primeira maneira que foi realizada a leitura de velocidade do motor foi por um dispositivo denominado *encoder*. Esse dispositivo é acoplado diretamente no eixo da máquina e tem a capacidade de analisar a rotação do motor a partir da leitura de pulsos emitidos por ele a cada rotação completa do eixo do motor, onde, esse sinal é denominado por Z. O encoder também fornece mais dois sinais de referência denominados por *encoder A* e *encoder B*, os mesmos tem a função de informar para qual direção o motor está girando, seja ela no sentido horário ou sentido anti-horário e são defasadas entre si por um ângulo de 90°.

De posse dessas informações foi utilizado um *encoder* incremental, da *Dynapar* modelo B58N, fornecido pelo laboratório NUPEP para que pudesse ser feito a leitura de velocidade do motor. Como o dispositivo fornece sinais que necessitam de interpretação lógica para a análise da velocidade, foi feito as configurações necessárias para essa interpretação.

As saídas de sinais do *encoder* são na faixa de 0 a 5V e como o microprocessador utilizado opera na faixa de 0 3,3V foi necessário elaborar um circuito que reduziria o nível desses sinais sem que houvesse perda de informações. Com isso, foi montado um circuito simples com transistores com alimentação em 3,3V que conseguiu, sem perda de informações, adaptar os sinais na faixa de operação do microprocessador. Esses sinais eram interligados em portas específicas do DSP que por sua vez foi elaborado o código que realizava a leitura de velocidade do motor. O circuito elaborado é apresentado na Figura B.1.

A conexão entre o *encoder* e o eixo do motor foi feito a partir de um acoplamento de mola, que aparentemente deveria amortecer as vibrações causadas pelo funcionamento do motor para que isso não atrapalhasse a leitura de velocidade. Esse acoplamento é demonstrado na Figura B.2.

Figura B.2 – *Encoder* com acoplamento de mola utilizado.



Como o motor não possui uma base fixa, o funcionamento do mesmo gerava muita vibração que por sua vez não permitia o *encoder* fazer de maneira correta as leituras de velocidade que influenciava no controle imposto, não ocorrendo o funcionamento desejado. Percebendo que a vibração estava influenciando nas leituras de velocidade, foi feito outro acoplamento para o *encoder*, dessa vez sem a mola no acoplamento, mas mesmo assim a vibração persistiu de uma forma mais branda, porém ainda interferindo nos resultados. O acoplamento sem mola utilizado é apresnetado na Figura B.3.

Figura B.3 – *Encoder* com acoplamento sem mola utilizado.



Fonte: Dados do próprio autor.

Como as leituras não estavam sendo feitas da maneira desejada por causa de interferências mecânicas optou-se por elaborar outra técnica, que de uma maneira indireta conseguiu fazer a leitura da velocidade do eixo do motor CC.