

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RACHEL CAMPAGNARO CARMINATI

**EMULADOR DE TURBINA DE GERAÇÃO EÓLICA COM GSIP
EMPREGANDO INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

VITÓRIA
2017

RACHEL CAMPAGNARO CARMINATI

**EMULADOR DE TURBINA DE GERAÇÃO EÓLICA COM GSIP
EMPREGANDO INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Domingos Sávio Lyrio Simonetti

Co-Orientador: Prof. José Luiz de Freitas Vieira

VITÓRIA
2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Carminati, Rachel Campagnaro, 1987-

C287e Emulador de turbina de geração eólica com GSIP
empregando inversor de frequência / Rachel Campagnaro
Carminati. – 2017.

84 f. : il.

Orientador: Domingos Sávio Lyrio Simonetti.

Coorientador: José Luiz Freitas Vieira.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Emuladores (Programas de computador). 2. Inversores
elétricos. 3. Energia renovável. 4. Turbina eólica. I. Simonetti,
Domingos Sávio Lyrio. II. Vieira, José Luiz Freitas. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV.
Título.

CDU: 621.3

RACHEL CAMPAGNARO CARMINATI

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 31 de outubro de 2017.

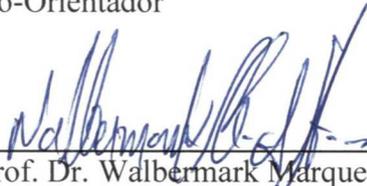
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Prof. José Luiz de Freitas Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-Orientador



Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Márcio Almeida Có
Instituto Federal do Espírito Santo

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

(Cora Coralina)

À minha família, ao Tico e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois somente Ele sabe todas as dificuldades enfrentadas e obstáculos superados ao longo desses anos e, mesmo assim, não me permitiu desistir. À minha família, em especial aos meus pais Dalva e Averaldo pelo suporte e apoio incondicional, presentes em todas as fases da minha vida, pacientes pela minha ausência e perseverantes ao meu sonho. Ao meu irmão Rodrigo, minha cunhada Rayene e minha afilhada Luna, que em muitos momentos abduquei de estar presente para dedicação aos estudos, agradeço a paciência e o amor de sempre.

Ao professor e orientador Domingos S. L. Simonetti, com ensinamentos fundamentais para realização desse sonho, pela paciência, perseverança, pelas contribuições, pelo tempo disponibilizado e pela confiança.

Aos demais professores do PPGEE por todo o apoio e incentivo, pela compreensão das dificuldades. Em especial aos professores José Luiz Vieira, Jussara F. Fardin, Moisés R. N. Ribeiro, Raquel F. Vasallo, Evandro O. T. Salles, Klaus F. Coco e Lucas F. Encarnação.

Aos amigos Odair B. Junior e Daniel Carletti pela presteza e ensinamentos, a Aline D. Oliveira pelo empréstimo do notebook e apoio nos momentos difíceis. Ao amigo Bruno Ferreira pelas dicas preciosas sobre inversores de frequência e Arduino. A Daniela Zouain pelas oportunas dicas de MatLab e inglês.

Aos colegas de laboratório (LEPAC) pelos conhecimentos compartilhados e momentos de descontração: Flávio Oliveira, Amanda Nascimento, Thiago Amorim, Arthur Amorim, Danilo Silva, Luiz Guilherme, Tatiane Macedo, e dos demais laboratórios Felipe Lobo, Murilo Daltio.

Aos meus gestores das empresas as quais trabalhei ao longo desses anos: Bruno G. de Souza, Cristiane Duarte, Fernando V. Baldotto, Afonso Celso F. da Silva, Lino H. Pedroni, Agostinho Barreira e João Brito.

Aos amigos de longa data e a todos vocês, minha eterna gratidão e o meu muito obrigada.

RESUMO

Neste trabalho é proposto o desenvolvimento e implementação de uma estrutura estática para emulação de sistemas de geração de energia eólica utilizando gerador síncrono a ímãs permanentes. Diferentemente das estruturas dinâmicas existentes, que utilizam motor acoplado a um gerador, o sistema emprega um inversor de frequência adequadamente controlado por um módulo digital para representar o comportamento turbina-gerador. Nesse estudo, são abordados temas referentes aos elementos conceituais e operacionais que descrevem o comportamento esperado de uma turbina eólica de forma a permitir que a emulação ocorra de forma fiel ao real. Também são discutidas as principais características dos equipamentos que foram configurados de forma a se comportar imitando a turbina eólica e o gerador síncrono. A estrutura desenvolvida foi implementada no laboratório LEPAC da Universidade Federal do Espírito Santo, com a premissa de praticidade e baixo custo, e para isso utilizou-se de equipamentos já existentes na instituição. O módulo de controle foi embarcado em uma placa Arduíno, com comunicação com um PC. Como inversor utilizou-se um WEG CFW09. Vários perfis de vento e algumas condições de carga foram testados. Os resultados obtidos, mostrados e analisados, comprovam a validade da metodologia proposta.

ABSTRACT

In this work the assembly of a static bench for emulation of wind power generation systems using permanent magnet synchronous generator is proposed. Unlike the existing dynamical benches, which use a motor coupled to a generator, the system uses a frequency inverter properly controlled by a digital module to represent the turbine-generator behavior. In this study, topics related to the conceptual and operational elements that describe the expected behavior of a wind turbine are discussed, in order to allow a near-real emulation to occur. The main characteristics of the equipment that have been configured to behave in imitation of the wind turbine and the synchronous generator are also discussed. The bench was set up in the LEPAC laboratory of the Federal University of Espírito Santo, with the premise of practicality and low cost, and for this made use of equipment already existing in the institution. The control module was shipped on an Arduino board, communicating with a PC. The WEG CFW09 inverter was used. Several wind profiles and some load conditions were tested. The results obtained, shown and analyzed, prove the validity of the proposed methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagramas do sistema eólico: (a) com DFIG e (b) com GSIP	22
Figura 2 – Modelagem com interface computacional e emprego de motor e gerador	23
Figura 3 – Diagrama do sistema estático desenvolvido com uso de inversor de frequência..	24
Figura 4 – Estrutura básica de uma microrrede	27
Figura 5 – Turbina eólica: principais componentes.....	28
Figura 6 – Diagrama das forças aerodinâmicas	30
Figura 7 – Turbinas de eixo horizontal e vertical	31
Figura 8 – Modelos de turbinas com diferentes quantidades de pás	32
Figura 9 – Curva típica de potência: (a) controle de <i>Pitch</i> e (b) controle de <i>Stall</i>	33
Figura 10 – Diagrama elétrico do sistema com uso do GSIP	37
Figura 11 – Circuito de potência do inversor de frequência.....	39
Figura 12 – Diagrama de blocos dos principais componentes internos ao inversor.....	40
Figura 13 – Modulação através da função PWM	41
Figura 14 – (a) Modelo de placa Arduino e (b) <i>IDE</i>	42
Figura 15 – Curvas de potência da turbina e curva de carga	44
Figura 16 – Faixas de operação e controle da turbina eólica emulada	45
Figura 17 – Curva da velocidade de saída em função da referência de velocidade do Inversor CFW09.....	50
Figura 18 – Curva da tensão de saída em função da referência de velocidade/frequência do inversor CFW09.....	51
Figura 19 – Diagrama do inversor CFW09	53
Figura 20 – Inversor CFW09 da WEG	54
Figura 21 – Diagrama de entradas e saídas analógicas e digitais do inversor CFW09	54
Figura 22 – Placa do Arduino Due	55
Figura 23 – Diagrama do circuito Pull Up.....	56
Figura 24 – Módulo do filtro passa baixa LC.....	57
Figura 25 – Carga resistiva Labvolt.....	57
Figura 26 – Diagrama simplificado do circuito de potência da Sistema Estático Desenvolvido	58
Figura 27 – Fluxograma da estratégia de controle.....	61
Figura 28 – Curvas de potência da turbina em função da carga	62

Figura 29 – Curvas de potência com carga resistiva constante igual a 24,22 Ω	64
Figura 30 – Curvas de potência com velocidade de vento constante igual a 11m/s e carga resistiva variável	64
Figura 31 – Curvas obtidas em uma emulação completa: (a) potência, (b) corrente, (c) velocidade do rotor, (d) frequência e (e) vento.....	66
Figura 32 – Tensão obtida na saída do filtro para velocidade do vento igual a 10 m/s.....	67
Figura 33 – Forma de onda da tensão para ventos de: (a) 8 m/s e (b) 10m/s.	68
Figura 34 – Frequência e forma de onda da tensão para ventos de 8 m/s e 10m/s.....	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2016	19
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Coeficientes de C_p	35
Quadro 2 – Especificações dos elementos da Turbina Eólica	48
Quadro 3 – Especificações dos elementos do GSIP	49
Quadro 4 – Principais características do Inversor WEG CFW09.....	49
Quadro 5 – o resumo da comunicação do tipo De / Para do Arduino / Inversor.....	56
Quadro 6 – Principais resultados esperados para carga de $21,2 \Omega$	63
Quadro 7 – Principais resultados esperados para carga de $24,22 \Omega$	63
Quadro 8 – Principais resultados esperados para carga de $28,25 \Omega$	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C.	Antes de Cristo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPU	Unidade Central de processamento
DIFG	Gerador de Indução com Dupla Alimentação
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
GSIP	Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
IHM	Interface Homem Máquina
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
LED	Diodo Emissor de Luz
LEPAC	Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamentos (UFES)
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PWM	Modulação por Largura de Pulso
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USB	Barramento Universal Série

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de varredura das pás
β	Ângulo de passo
C_a	Coefficiente de arraste
C_p	Coefficiente de potência
C_s	Coefficiente de sustentação
f	Frequência
F_a	Força de arraste aerodinâmica
F_s	Força de sustentação
I_{inv}	Corrente do inversor
n_s	Velocidade síncrona
p	Número de pares de polos
P	Potência disponível no vento
P_{inv}	Potência do inversor
$P_{t_máx}$	Potência teórica máxima
P_w	Potência da turbina eólica
R	Raio da turbina
V_{inv}	Tensão do Inversor
V_w	Velocidade do vento
λ	Relação de velocidade do vento na ponta da pá
π	Número Pi
ρ	Massa específica do ar
ω	Velocidade angular

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	18
1.1 Sistemas de ensaios convencional	23
1.2 Proposta do trabalho	23
1.3 Organização do trabalho	24
CAPÍTULO 2: GERAÇÃO EÓLICA.....	26
2.1 Geração distribuída.....	26
2.2 Turbinas eólicas.....	28
2.2.1 Principais características das turbinas eólicas	29
2.2.2 Os controles de eficiência.....	32
2.2.3 A modelagem	34
2.3 Geração com GSIP	36
CAPÍTULO 3: O SISTEMA ESTÁTICO DESENVOLVIDO.....	38
3.1 Descrição do sistema proposto	38
3.1.1 O inversor de frequência	38
3.1.2 O Arduino.....	42
3.1.3 A carga	43
3.2 Estratégia de controle	43
CAPÍTULO 4: O SISTEMA IMPLEMENTADO.....	48
4.1 Seleção e configuração dos equipamentos	48
4.2 Arquitetura de controle.....	58
4.3 Resultados obtidos.....	62
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
APÊNDICE A	76

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura mundial, promover a sustentabilidade deixou de ser um desafio e passou a ser necessidade para o equilíbrio sócio-ambiental do planeta. Nas últimas décadas, foi percebido mudanças sem precedentes no consumo dos recursos energéticos e na geração de energia. Pode-se destacar como principais causas o fato de se ter um crescimento do mercado de energias renováveis somado ao aumento da capacidade instalada, o crescimento do uso de novos recursos e as melhorias e evoluções das tecnologias (WEC, 2016).

Em 2005, a principal fonte de energia consumida no mundo era o petróleo e representava cerca de 35,96% da matriz primária. Em 2015, esse número caiu para 32,94%. Apesar do petróleo ser a principal fonte utilizada mundialmente, é percebido o aumento da participação de outras fontes. Destaca-se a energia eólica, que saiu de singelos 0,22% para 1,44% da geração mundial no mesmo período (WEC, 2016).

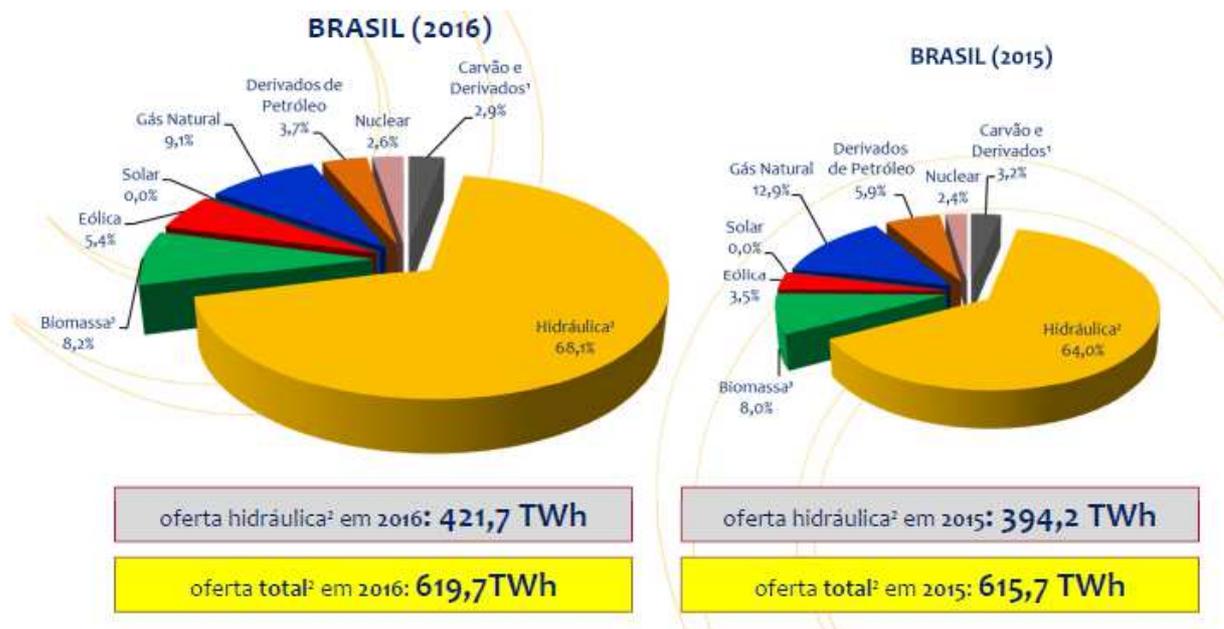
A energia eólica a nível global somou 435 GW de energia gerada em 2015, representando cerca de 7% da capacidade e cerca de 4% da geração global, com um investimento aproximado de US\$ 109 bilhões. A previsão de crescimento até 2030 é de 542 GW elevando a um patamar acumulado de 977 GW em capacidade de geração. No cenário mundial, além das grandes potências como EUA e China, destaca-se a Dinamarca, que produziu cerca de 42% de sua energia através da energia dos ventos (WEC, 2016).

Em 2013, mais de 70% da energia elétrica gerada no Brasil foi proveniente de usinas hidrelétricas (EPE, 2014). No ano seguinte a crise hídrica ocorrida mostrou o quão importante é para o país não ficar dependente de poucas formas de geração de energia, isto é, a matriz elétrica precisa ser diversificada. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a falta de chuvas no ano de 2014 fez com que o volume de água dos reservatórios das principais hidrelétricas do país atingisse níveis mais baixos do que os apurados em 2001, ano em que o racionamento de energia foi adotado no país afetando milhões de consumidores de energia elétrica. Com isso, a oferta de energia hidráulica sofreu decréscimo de 5,6% em 2014 em comparação a 2013 (EPE, 2015).

Para suprir essa lacuna de oferta de energia faz-se necessário o estudo de geração a partir de fontes alternativas. Atualmente, existem usinas termelétricas que são utilizadas para suprir a demanda por energia em condições adversas como a citada. Entretanto, há diversos inconvenientes em se utilizar essa forma de geração, como o elevado valor despendido na geração de cada kWh quando comparado à geração a partir de hidrelétricas, além da grande liberação de poluentes na atmosfera, visto que a energia é gerada através da queima de combustíveis fósseis.

O uso de termelétricas afeta o custo da energia, refletindo na inflação. Uma alternativa para contornar o problema é o investimento em geração de energia limpa, como a eólica. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2017, ano base 2016, 5,4% da energia gerada no Brasil foi proveniente da geração eólica, enquanto que em 2015 esse valor foi de 3,5%, mostrando uma tendência de crescimento desse tipo de geração. O Gráfico 1 mostra a oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2015 e 2016.

Gráfico 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil em 2016



Fonte: EPE (2017).

A geração de energia eólica no Brasil cresceu 53,4% quando comparado o ano de 2016 a 2015. No cenário atual, o país conta com cerca de 434 usinas e capacidade instalada aproximada de 10,5 MW (ANEEL, 2017).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil de hoje apresenta sua matriz elétrica fundamentada na geração hídrica, representando aproximadamente 61,4% da capacidade instalada, seguida pela geração a base de combustível fóssil com aproximadamente 6,6%. Ou seja, em qualquer eventualidade climática ou econômica o Brasil passa a depender fortemente das demais fontes de energia: eólica com 6,7%, nuclear com 1,23%, solar com cerca de 0,11% e biomassa com aproximados 8,74% da capacidade. Importante frisar que aproximadamente 5,05% da energia consumida pelos brasileiros provém da importação de outros países (ANEEL, 2017).

Dessa forma, a maioria dos países busca uma matriz energética diversificada, de forma a flexibilizar a geração de energia, deixando-os menos frágeis e expostos ao risco de uma crise energética. Os impactos do aumento de consumo de energia devido ao desenvolvimento econômico, às constantes crises climáticas globais e às variações constantes no preço do petróleo subsidiam os altos investimentos que o setor tem recebido (WEC, 2016).

Além dos fatores sociais e econômicos, o fator ambiental tem um peso considerável na mudança de cenário. Hoje é substancial a necessidade de mitigar os impactos ambientais provocados pelas fontes tradicionais.

A queda nos custos de fabricação fez com que essas fontes alternativas de energias fossem massivamente estudadas e testadas, permitindo o crescimento dos sistemas de macro e micro geração de energia.

O Brasil é um país tropical com uma faixa litorânea extensa e com abundância em recursos naturais. Esses fatores são premissas básicas para que um país tenha uma matriz energética limpa. O Brasil permanece como líder entre os países com maior participação de fontes renováveis em sua matriz. Em 2015, a emissão de gases do efeito estufa no Brasil foi reduzida em cerca de 4,7% em relação a 2014 (EPE, 2017).

Além disso, no ano de 2012 houve um forte incentivo à ampliação do uso de fontes limpas em solo nacional. A Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 oficializa esse incentivo:

“(…) o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. Trata-se da micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, inovações que podem aliar economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade.” (ANEEL, 2012).

Os termos microgeração e minigeração são definidos pela Resolução Normativa nº 482/2012 da seguinte forma: microgeração distribuída é definida como sendo uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectada à rede de distribuição por meio de instalações de unidade consumidoras; a definição de minigeração distribuída é bem similar, diferindo apenas em relação à potência instalada, que é superior a 100 kW e inferior a 1 MW (ANEEL, 2012).

Para aprimorar e viabilizar os estudos do funcionamento dos sistemas geradores eólicos, é necessário conhecer os princípios básicos e as leis que regem a sua operação. Nas turbinas mais modernas, em sua grande maioria, o processo de obtenção e conversão da energia dos ventos em energia elétrica acontece através das forças aerodinâmicas, baseadas nos conceitos da aviação. Vale ressaltar que, nessa modalidade não há como estocar ou armazenar o vento, de forma que somente é capaz de se produzir a energia através do recurso disponível naquele momento.

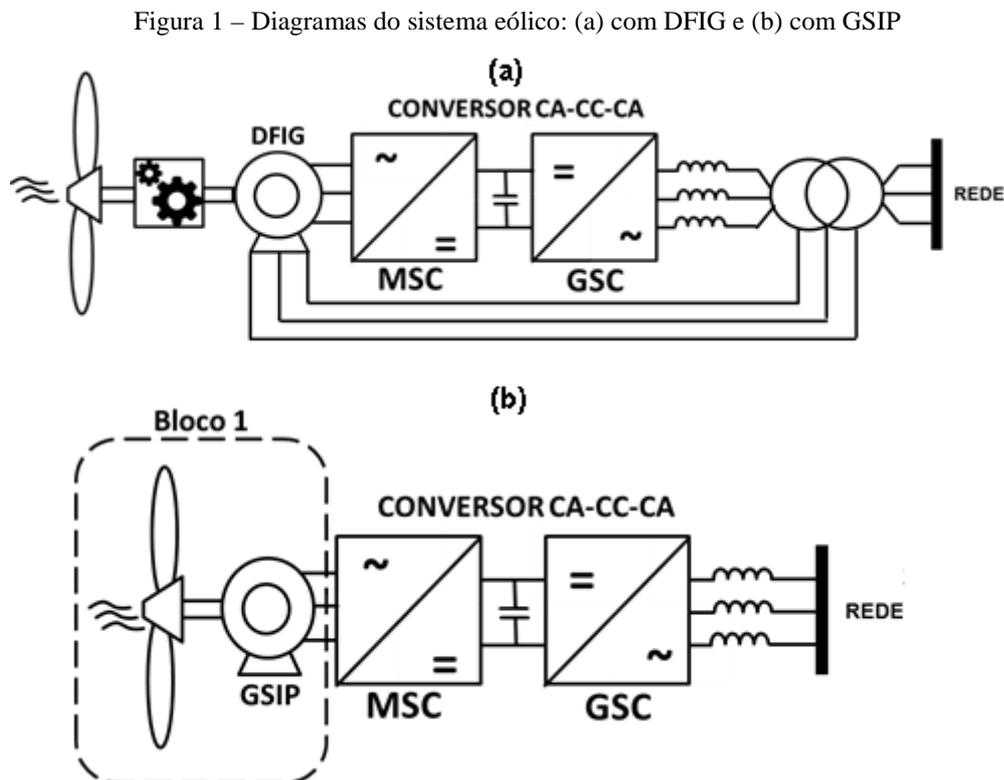
São três os tipos principais de máquinas elétricas usualmente encontradas na geração eólica: O primeiro modelo, que utiliza o gerador gaiola de esquilo, é ligado diretamente à rede. É o modelo mais antigo e a quantidade de potência gerada é dada em função do escorregamento. Necessita ainda de capacitores de compensação devido ao consumo de potência reativa pelo mesmo e somente são utilizados em turbinas de velocidade constante.

O segundo modelo faz uso de gerador de indução com dupla alimentação (*DFIG* da sigla em inglês). O *DFIG* utiliza na alimentação do seu rotor um conversor com valor nominal percentualmente inferior à potência do gerador. Caracteriza-se pelo desacoplamento da frequência elétrica da rede e controle de potência reativa com independência do controle do torque e da corrente de excitação. Independente da frequência mecânica, o rotor opera em

estreita faixa de variação de velocidade e necessita de caixa de transmissão mecânica. (CHAN e LAI, 2007).

O GSIP é um sistema que emprega o gerador síncrono que é totalmente desacoplado da rede, através do conversor eletrônico de potência e elimina a necessidade de caixa de engrenagens. Para o lado do gerador, utiliza-se um conversor CA-CC (retificador); já para o lado da rede, é necessário um conversor CC-CA de tensão (inversor). Com uso do GSIP, toda tensão gerada é inicialmente retificada para posterior injeção à rede. Pelas características mencionadas acima optou-se pelo desenvolvimento da bancada com o uso de gerador síncrono.

A Figura 1 mostra o diagrama simplificado da geração em (a) *DFIG* e em (b) com GSIP.



Fonte: produção do próprio autor (2017).

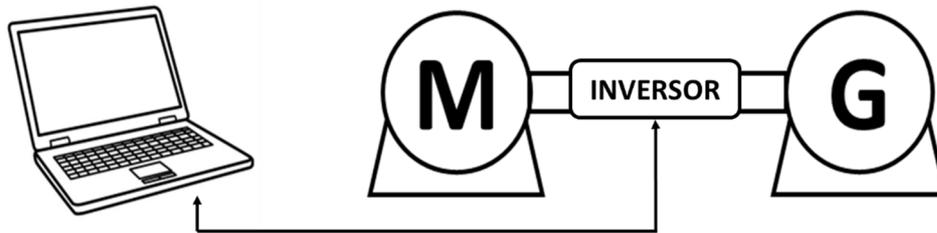
Assim, o impacto do sincronismo e do controle das energias renováveis também devem ser levados em consideração e amplamente testados antes de serem implementados. Torna-se fundamental que os conversores eletrônicos utilizados para injeção da energia alternativa na rede elétrica, bem como estratégias de controle aplicadas, sejam exaustivamente testados em laboratório antes de sua aplicação no sistema elétrico (ZHONG e WEISS, 2011).

Com base nos fatos acima, emuladores físicos são construídos para testar as interações entre as turbinas de vento e a rede de energia em tempo real (ZHONG e WEISS, 2011), de forma a facilitar os estudos e aprimorar as tecnologias já existentes.

1.1 Sistemas de ensaios convencionais

Na maioria dos sistemas de vento emulados, faz-se necessário modelar a turbina, o gerador, os conversores, o filtro e os controladores. No caso de geração eólica, o sistema que usualmente é empregado é mostrado na Figura 2. É composto por um motor elétrico alimentado por um inversor, sendo esse último comandado por um sistema computacional que reproduz as características velocidade *versus* potência da turbina, que aciona o gerador a ser estudado.

Figura 2 – Modelagem com interface computacional e emprego de motor e gerador



Fonte: produção do próprio autor (2017).

1.2 Proposta do trabalho

Os geradores de fontes renováveis de energia são normalmente empregados em sistemas de geração distribuída e micro geração. Em sua grande maioria necessitam de conversores CC-CA para conexão à rede elétrica. Na geração eólica com GSIP, a máquina síncrona gera tensão CA onde a frequência é variável. Faz-se necessária então a conversão para tensão CC e depois novamente a conversão para tensão CA de forma a possibilitar que o conjunto atue na frequência da rede.

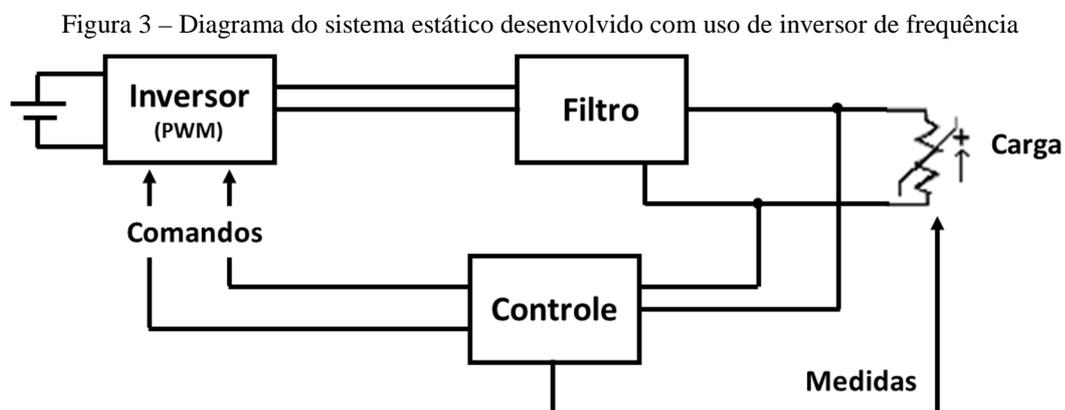
Recentemente, conversores eletrônicos de potência vêm sendo empregados para se comportarem como várias fontes de energia e cargas. Isso fornece uma maneira flexível e

simples de testar e analisar as características dos sistemas emulados (YANG, WANG, WANG e TOLBERT, 2013).

Assim, não somente o Brasil, mas vários outros países no mundo como os países europeus, EUA e China investem cada vez mais em tecnologias que garantam a qualidade do fornecimento, a eficiência energética e em sistemas que permitam o controle e o sincronismo dos geradores à rede para a produção baseada em fonte alternativa de energia.

Desta forma, este projeto de pesquisa pretende analisar, simular e desenvolver um sistema experimental estático para a emulação de uma turbina eólica com um gerador síncrono a ímãs permanentes empregando processador digital e inversor de frequência. A premissa utilizada foi empregar equipamentos já existentes e de fácil aquisição, de forma a garantir baixo custo no desenvolvimento, praticidade e viabilidade econômica da bancada estática.

O sistema em estudo visa a substituição física do sistema turbina gerador, representado na Figura 1(b) pelo bloco 1, por um sistema composto por um inversor de frequência, filtro e malha de controle, conforme a Figura 3. Para efeito de testes uma carga resistiva foi utilizada.



Fonte: produção do próprio autor (2017).

1.3 Organização do trabalho

A dissertação está dividida em cinco capítulos. Adiante, segue breve detalhamento dos principais temas abordados. O Capítulo 2 mostra as teorias e conceitos que envolvem a geração de energia elétrica através dos ventos, além das características físicas das turbinas existentes. Também aborda a geração de energia empregando gerador síncrono a ímãs permanentes.

O Capítulo 3 descreve a filosofia de controle e a topologia proposta para o emulador. Detalha os equipamentos utilizados e suas funcionalidades, assim como o perfil dinâmico da bancada estática, premissas adotadas e principais funcionalidades.

O Capítulo 4 apresenta o sistema implementado, as especificações técnicas dos equipamentos escolhidos, o controle utilizado, as principais parametrizações e os resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas através dos resultados, comentando os principais aspectos operacionais destacando os sucessos e insucessos da topologia e da estratégia de controle proposta, com sinalização de possíveis avanços.

CAPÍTULO 2: GERAÇÃO EÓLICA

Esse capítulo apresenta os conceitos básicos da geração eólica de energia, utilizadas na primeira parte do estudo, cujo objetivo é modelar a turbina eólica de forma a traçar a curva de potência com base no perfil de vento. Aqui estão descritas todas as equações utilizadas para modelar o comportamento da turbina.

2.1 Geração distribuída

De acordo com o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), a geração distribuída (GD) pode ser definida como sendo qualquer fonte geradora de energia com produção destinada, em sua maior parte, a cargas locais ou próximas, alimentadas sem necessidade de transporte da energia através da rede de transmissão (INEE, 2001).

A geração distribuída se tornou alternativa às tradicionais soluções no processo de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, devido à constante procura por serviços e tecnologias mais eficientes com impactos ambientais reduzidos (DIAS, BOROTNI e HADDAD, 2005).

A geração distribuída tem como vantagens a possibilidade de postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão tradicionais, a redução do impacto ambiental quando comparada a outras formas de geração, o menor tempo de implantação, a redução no carregamento das redes, a redução de perdas técnicas e a melhoria no nível de tensão da rede no período de carga pesada. Por outro lado, pode-se destacar como desafios a serem enfrentados com a implementação dessa tecnologia o aumento da complexidade de operação da rede de distribuição, aumento da dificuldade para controlar o nível de tensão da rede no período de carga leve, alteração dos níveis de curto-circuito das redes, aumento da distorção harmônica na rede, intermitência da geração, alto custo de implantação e tempo de retorno elevado para o investimento.

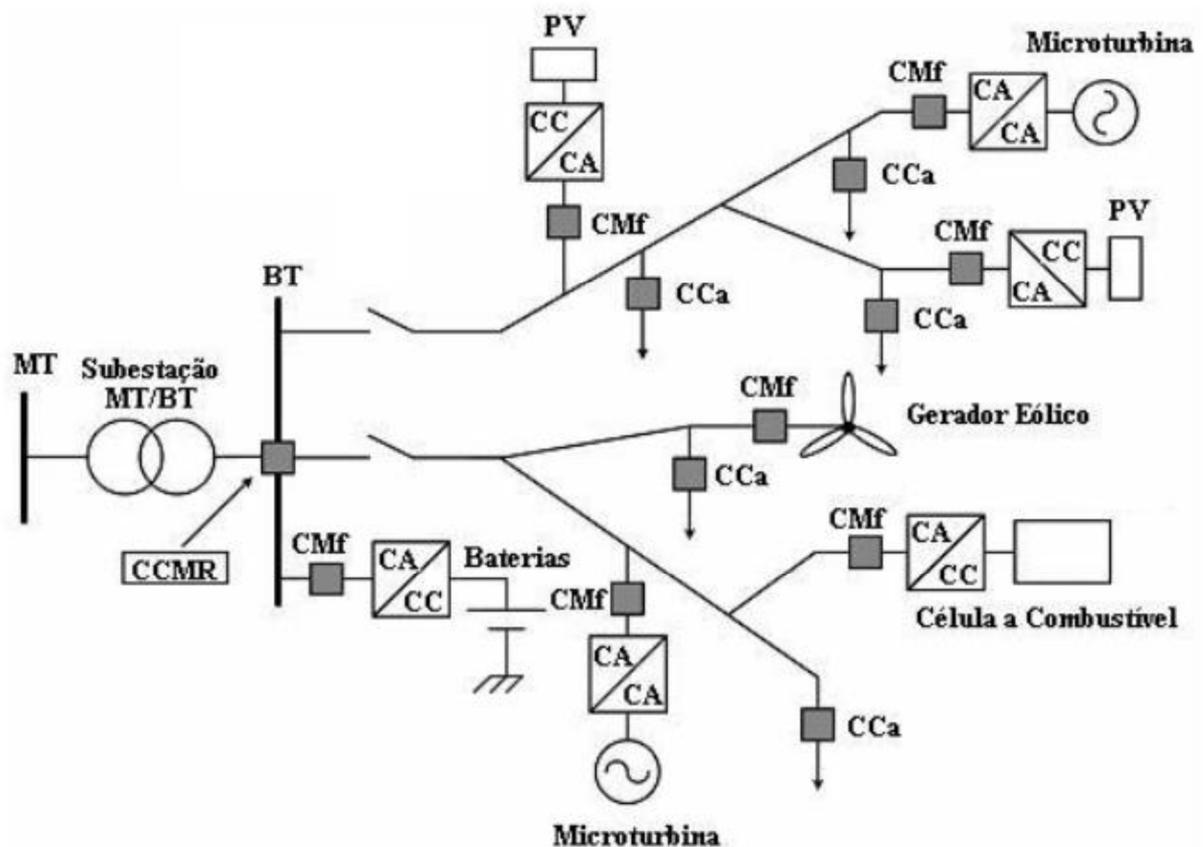
A tecnologia da geração distribuída torna o sistema mais complexo e por isso é necessário o uso de tecnologias de controle e monitoramento, tendo em vista que a rede não é capaz de

controlar o funcionamento das GDs. Para solucionar o desafio da inserção de geração nas redes de distribuição surge o conceito de microrrede (RESE, 2012).

A microrrede pode ser definida como a inserção de unidades de microgeração e/ou minigeração de energia, além de dispositivos de armazenamento de energia e sistemas para realizar o controle das microfones (solar, eólica, célula a combustível, dentre outras) e das cargas conectadas ao sistema, à rede de baixa tensão (BT) (HATZIARGYRIOU et al., 2006).

Na Figura 4 está representada a estrutura básica de uma microrrede, que é composta de diversas fontes alternativas de energia, como painéis fotovoltaicos, microturbinas, gerador eólico e célula a combustível. Inclui também baterias para armazenamento de energia, conversores/inversores de frequência, cargas e elementos de controle.

Figura 4 – Estrutura básica de uma microrrede



Fonte: Moreira (2008).

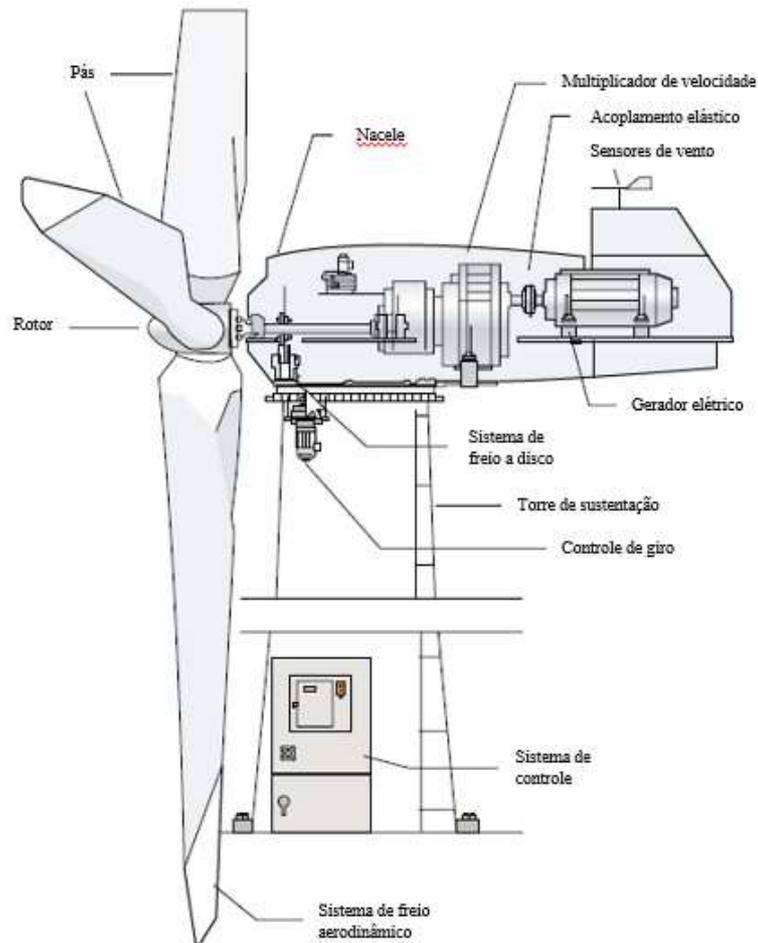
2.2 Turbinas eólicas

As equações e modelos atuais para estudos e emulações de turbinas eólicas provêm da inspiração aerodinâmica de aviões, onde o processo de conversão de forças aerodinâmicas é utilizado para produzir o torque de rotação no eixo do gerador que, por sua vez, transforma a energia mecânica em elétrica.

As turbinas eólicas são também conhecidas como “cataventos” ou “moinhos de ventos”. Há registros por volta de 3.000 a.C do uso do vento para moagem de grãos e elevação de água pelos egípcios, e em 300 a.C apareceram os primeiros registros de uso no acionamento de máquinas (CUSTODIO, 2009).

A turbina eólica é composta basicamente por: rotor, nacelle e torre e está mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Turbina eólica: principais componentes



Fonte: ANEEL (2007).

O rotor é composto pelo eixo e pelas pás, as pás são quem captam a energia proveniente do vento e transferem para o eixo, e normalmente há acoplamento do rotor a um sistema de frenagem.

Na nacele é onde se encontram os principais componentes da turbina, da transmissão e do gerador. A transmissão é responsável pela interligação entre o eixo de baixa velocidade (onde se encontram as pás) com o eixo de alta velocidade (eixo do gerador). Esse último faz a conversão da energia mecânica do movimento de rotação das pás em energia elétrica.

2.2.1 Principais características das turbinas eólicas

São dois os tipos de turbinas existentes, as que utilizam força de arraste e as que utilizam força de sustentação. As turbinas de arraste são aquelas que o vento empurra as pás fazendo com que o rotor gire. O vento que flui sobre as pás provoca uma força de arraste descrita pela Equação (1) (CUSTODIO, 2009).

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_a \cdot A \cdot V_w^2 \quad (1)$$

Onde,

F_a : força de arraste aerodinâmica [N];

ρ : massa específica do ar [kg/m^3];

V_w : velocidade do vento [m/s];

C_a : coeficiente de arrasto [adimensional];

A : área varrida pelas pás [m^2];

O coeficiente de arraste depende do formato da lâmina e varia de acordo com seu desenho e dimensões. Para as turbinas que utilizam força de arraste, a velocidade das pás é limitada de acordo com a velocidade do vento, com isso sua eficiência é limitada. Esse tipo de turbina é frequentemente utilizado para regiões com ventos de baixa velocidade (CUSTODIO, 2009).

As turbinas de sustentação são inspiradas nas asas dos aviões. Nesse modelo existe uma força denominada força de empuxo que é composta por duas sub forças, a de arraste e a de sustentação, descrita pela Equação (2) (CUSTODIO, 2009).

$$F_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_s \cdot A \cdot V_w^2 \quad (2)$$

Em que,

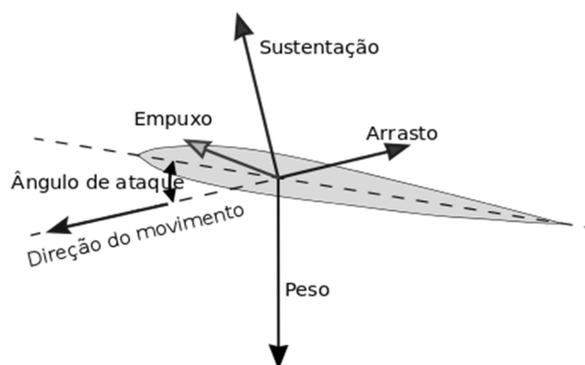
F_s : força de sustentação [N];

C_s : coeficiente de sustentação [adimensional];

O coeficiente de sustentação varia em função das dimensões e características aerodinâmicas da seção da pá. Essas forças estão representadas na Figura 6.

Outra característica das turbinas eólicas é quanto à orientação do eixo, podendo ser vertical ou horizontal. As turbinas de eixo horizontal, que é o tipo mais utilizado atualmente, precisam se manter perpendiculares à incidência do vento. Normalmente utilizadas em instalações de maior potência para produção de energia elétrica, e o gerador é instalado no ponto mais alto da torre, ao contrário das turbinas de eixo vertical, onde a caixa de transmissão e o gerador ficam na base.

Figura 6 – Diagrama das forças aerodinâmicas

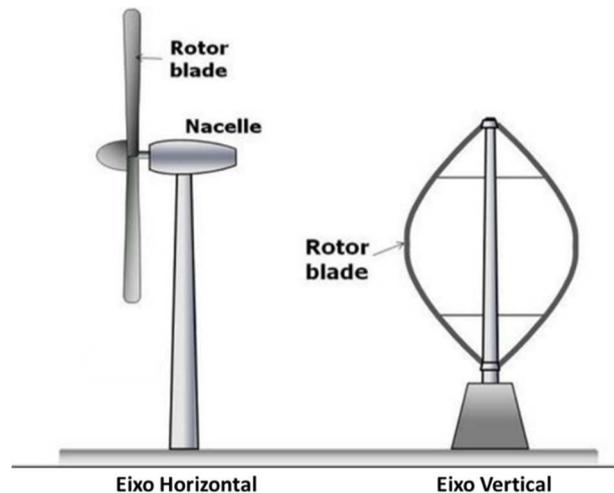


Fonte: Adaptado da Eletrobrás.

As turbinas de eixo horizontal são movidas predominantemente por forças de sustentação, devendo possuir mecanismos capazes de ajustar a orientação das pás conforme a direção do vento. Esse ajuste das pás é realizado através de sistemas automatizados. Já para turbinas de eixo vertical existe a vantagem de aproveitar ventos em qualquer direção, podendo ser movidas por forças de arrasto e por forças de sustentação, o que torna o controle menos complexo (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Uma desvantagem no uso de turbinas de eixo vertical é o fato de suas pás ficarem próximas ao solo, local onde o vento apresenta menor velocidade, além de maior turbulência. Em contrapartida esse tipo de turbina possibilita deslocar todo o maquinário pesado presente na nacelle para o solo, facilitando a manutenção do sistema (FERREIRA, 2011). Na Figura 7 são apresentados os tipos de turbina conforme o eixo de orientação.

Figura 7 – Turbinas de eixo horizontal e vertical

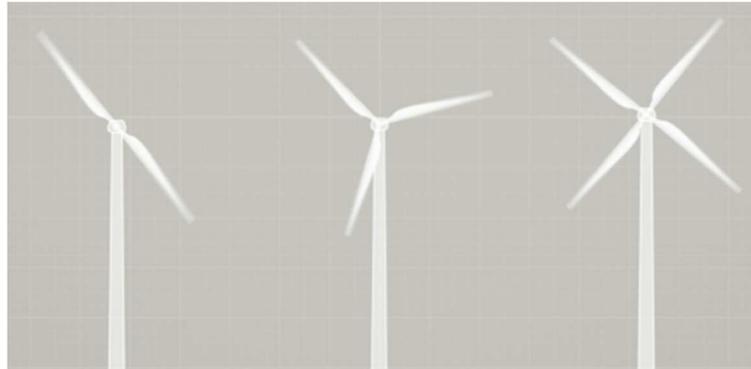


Fonte: Adaptada de TYPMAR (<http://russian.cntimar.com>).

Dentre as vantagens das turbinas de eixo horizontal, pode-se destacar a viabilidade de controle do ângulo das pás, que possibilita o controle de velocidade do rotor e da potência de saída. Além disso, as turbinas com esse tipo de configuração têm acesso a ventos de maior velocidade e apresentam maior eficiência, visto que a incidência dos ventos se dá de forma perpendicular às pás (PINTO, 2013).

As turbinas também se diferem conforme o número de pás no seu rotor. Quanto maior o número de lâminas maior o torque sobre o eixo do rotor, e quanto menor o número de pás mais rapidamente será o giro do rotor, pois uma pá rodando no espaço que já foi percorrido por outra vai encontrar um ar perturbado. Para geração de energia elétrica é requerido baixo torque, logo são comumente utilizadas turbinas com poucas pás. O modelo com 3 pás é o mais estável e é o mais utilizado nas turbinas atuais. A Figura 8 ilustra turbinas de 2, 3 e 4 pás, respectivamente (CUSTODIO, 2009).

Figura 8 – Modelos de turbinas com diferentes quantidades de pás



Fonte: Adaptada de <https://www.engenhariacivil.com/turbinas-eolicas-3-pas>.

2.2.2 Os controles de eficiência

Como descrito nas seções anteriores, as pás das turbinas eólicas são similares às asas dos aviões, na qual as forças aerodinâmicas convertem a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional. Essa dinâmica de conversão necessita de controle, sendo três os tipos de controle de eficiência de forma a garantir o rendimento máximo na geração e a segurança de operação: o controle de Estol passivo, o controle de Passo e o controle de Estol ativo.

O primeiro controle, o de Estol (do inglês *Stall*), é um controle passivo, as pás da turbina são fixas e possuem sua aerodinâmica projetada com determinado ângulo que faz surgir uma turbulência quando se tem velocidades de vento incidente maiores que a nominal. Essa turbulência reduz a força de sustentação e aumenta a de arrasto, controlando a potência de saída da turbina, sendo que em determinadas situações pode ocasionar vibrações devido ao estol (CUSTODIO, 2009). Nesse controle, a potência extraída do vento oscila em torno da potência nominal da turbina quando a velocidade do vento é igual ou superior a nominal.

O controle de Passo (*Pitch*), semelhante ao anterior, atua quando a potência de saída é superior à capacidade da turbina. É basicamente o controle do ângulo de inclinação (ataque) das pás em torno do seu próprio eixo, que diminui as forças aerodinâmicas atuantes e a extração de potência do vento. Trata-se de um controle ativo normalmente operado por sistemas hidráulicos ou elétricos. Nesse controle, quando a velocidade do vento incidente é igual ou superior a nominal há uma melhor estabilidade da potência extraída que é limitada no valor da potência nominal.

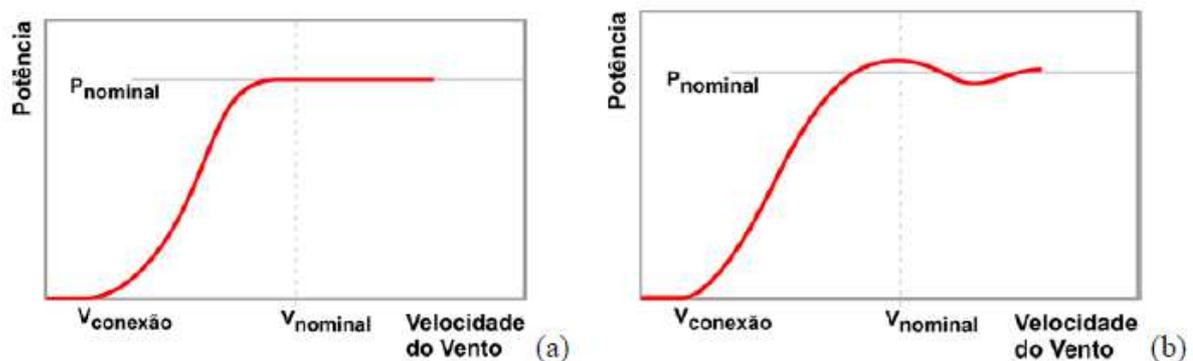
No controle de Estol Ativo, tem-se um híbrido entre o controle de Estol e o de Passo, o sistema torna-se menos robusto e mais simples de operar. Isso é normalmente realizado por operação hidráulica ou elétrica.

O controle de *Stall* apresenta as seguintes vantagens em relação ao controle de *Pitch*: inexistência de controle de passo, estrutura do rotor mais simples, menos manutenção devido ao menor número de peças móveis, autocontrole da potência, ou seja, é um sistema de controle mais simples.

O controle de *Pitch* é mais sofisticado, visto que precisa de um sistema de variação de passo. Destacam-se como vantagens desse tipo de controle: a possibilidade de controlar a potência ativa sob todas as condições de vento, podendo alcançar a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar, maior produção de energia sob as mesmas condições e partida simples do rotor pela mudança do passo.

A Figura 9 ilustra o comportamento da curva de potência para os controles citados: (a) controle de *Pitch* e (b) controle de *Stall*. Nota-se que no controle de passo (a) a turbina produz apenas a potência nominal, enquanto no controle de estol (b) há pequenas oscilações de potência em torno da nominal.

Figura 9 – Curva típica de potência: (a) controle de *Pitch* e (b) controle de *Stall*



Fonte: Ferreira (2011).

2.2.3 A modelagem

A potência que é extraída do fluxo de ar aplicado a uma turbina é representada pela Equação (3) e depende da velocidade do vento atingindo as pás (SLOOTWEG, 2003).

$$P_w = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (3)$$

Onde P_w é a potência mecânica entregue no eixo [W], A é área varrida pelas pás [m²], V_w é a velocidade do vento [m/s] e ρ é densidade do ar [kg/m³], que ao nível do mar e à temperatura de 15°C tem o valor de 1,225 kg/m³ (CUSTODIO, 2009).

A potência ainda está em função do coeficiente de potência C_p [adimensional], que mede a eficiência na qual a turbina transforma a energia cinética do vento em energia mecânica no rotor. Isso significa que quanto maior for o C_p , maior será a capacidade de absorção da potência do vento, resultando em maior potência entregue à turbina. O coeficiente de potência teórica máximo alcançado por uma turbina eólica é de 0,593, conhecido como Máximo de Betz ou coeficiente de Betz, representado pela Equação (4) (WENZEL, 2007).

$$P_{t_m\acute{a}x} = \frac{16}{27} \cdot P \quad (4)$$

Em que P é a potência disponível no vento.

A importância do coeficiente de potência deve-se ao fato de que é possível resumir em uma única curva o comportamento de turbinas do mesmo tipo para diferentes velocidades do vento, independentemente da densidade do ar e do raio da turbina. Este projeto utilizou o modelo sugerido por Sloodweg que é descrito pela Equação (5) (OLIVEIRA, 2016).

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \cdot \beta^{C_5} - C_6 \right) e^{-\frac{C_7}{\lambda_i}} \quad (5)$$

No Quadro 1, são apresentados os valores dos coeficientes utilizados para os cálculos de C_p .

Quadro 1 – Coeficientes de Cp

Elemento ou Grandeza	Valor ou Modelo
C ₁	0,73
C ₂	151
C ₃	0,58
C ₄	0,002
C ₅	2,14
C ₆	13,2
C ₇	18,4
C ₈	-0,02
C ₉	-0,003

Fonte: Oliveira (2016).

A Equação (5) mostra que C_p é uma função de λ e λ_i , cujo significado prático é valorar a relação da velocidade do vento na ponta da lâmina da turbina com a velocidade angular do rotor sendo seu comportamento descrito pelas Equações (6) e (7) (OLIVEIRA, 2016).

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_w} \quad (6)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + C_8 \cdot \beta} - \frac{C_9}{\beta^3 + 1}} \quad (7)$$

Onde,

λ : relação de vento na ponta da pá [adimensional];

λ_i : constante adimensional função de λ e β .

C_8 : coeficiente de Sootweg [adimensional];

C_9 : coeficiente de Sootweg [adimensional];

R : raio da turbina [m];

O ângulo de ataque, ou ângulo de inclinação, é representado por β . Neste estudo, esta variável não será assim considerada e, portanto, $\beta = 0^\circ$, o que representa a ausência de controle de potência por Estol ou Passo.

2.3 Geração com GSIP

O gerador síncrono de ímãs permanentes é composto por um estator onde estão alojadas as bobinas nas quais são induzidas tensões devidas ao movimento do rotor. O rotor é constituído por ímãs fixos, ou permanentes, que geram o campo magnético da máquina. Esse campo magnético induz no estator uma tensão alternada (e uma corrente quando alimentando uma carga). Os GSIP podem ser monofásicos ou trifásicos (GASPAR, 2013).

No rotor se apresenta a principal característica que difere essa máquina das demais. Nas máquinas síncronas é comum se ter rotor bobinado, onde cada bobina inserida no material ferromagnético forma um par de polos. Essas bobinas são alimentadas por uma corrente contínua que produz um fluxo magnético que, conduzido através do entreferro, chega até a bobina do estator. Ao substituir esses polos por ímãs, o rotor produz naturalmente o fluxo magnético necessário para excitação da máquina, sem necessidade de excitação externa.

As vantagens do uso do GSIP na geração de energia eólica ocorrem pela diminuição dos ruídos gerados, permitindo a instalação de usinas em áreas urbanas; a redução dos custos inerentes a caixa de transmissão, que não se faz necessário a esse sistema; eficiência do sistema quanto a extração da potência, que resulta em máquinas com alto fator de potência.

Como afirmado por Silva (2008), além de não necessitar de sistemas de excitação externa e nem de comutação devido a auto excitação, possui menos perdas por efeito Joule (estudos realizados demonstram que as máquinas de ímãs permanentes permitem uma redução das perdas da ordem de 25% relativamente às de indução) e são máquinas mais compactas para uma mesma potência da máquina bobinada, ocupando menos espaço físico. Esses fatores contribuem para que sua utilização se torne economicamente viável.

A desvantagem de usar um GSIP está no fato de que o fluxo magnético não pode ser controlado como nas máquinas de rotor bobinado, assim não é possível controlar a potência reativa pelo fluxo como em uma máquina síncrona convencional.

Além disso, devido aos conversores estarem presentes na saída do aerogerador, é necessário dimensioná-lo de acordo com a potência nominal do conjunto turbina/gerador o que,

usualmente, encarece bastante o tipo de tecnologia. E, por conseguinte, aumenta o diâmetro do gerador devido ao elevado número de polos. Essa característica, para geradores de grande porte, pode tornar o custo do GSIP não atrativo em função das condições de mercado, porém, para baixas potências e uso em micro redes eólicas, o GSIP apresenta um custo benefício adequado (SILVA, 2008).

O conversor tem a função de converter a frequência da energia gerada para a frequência de operação da rede. A frequência do gerador é dada pela velocidade mecânica em função do número de pares de polos, como descrito pela Equação (8). (FITZGERALD, 1975).

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (8)$$

Onde,

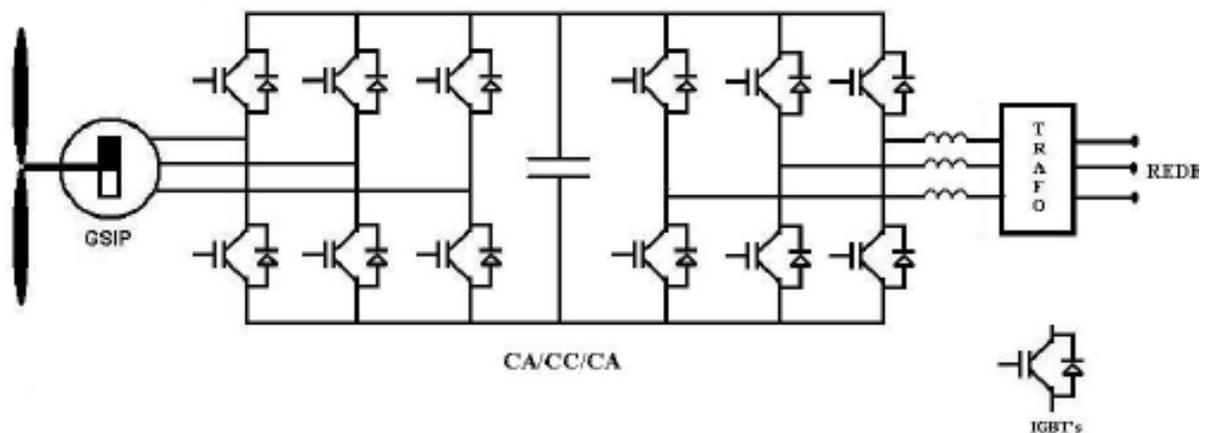
n_s : velocidade síncrona [rad/s];

p : número de pares de polos [adimensional];

f : frequência [Hz];

A estrutura mostrada na Figura 10 é a mais comumente utilizada, na qual se apresenta o gerador conectado diretamente ao eixo da turbina, dois conversores trifásicos *PWM* por meio de um barramento CC, filtro L ou de maior ordem, e um transformador para adequar a faixa de tensão. A configuração apresentada é a *back-to-back* (CA-CC-CA).

Figura 10 – Diagrama elétrico do sistema com uso do GSIP



Fonte: produção do próprio autor (2017).

CAPÍTULO 3: O SISTEMA ESTÁTICO DESENVOLVIDO

3.1 Descrição do sistema proposto

O sistema desenvolvido pretende, para fins de pesquisa e didática, a substituição física do conjunto turbina-gerador, representado na Figura 1(b) pelo bloco 1, por um conjunto composto por um inversor de frequência, filtro e sistema de controle, como mostrado pela Figura 3. Isso representa uma abordagem estática em contraste com o da Figura 1.

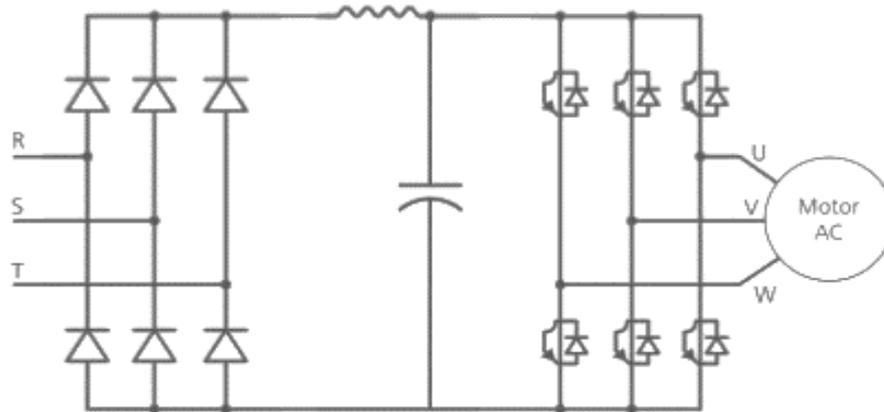
O sistema estático desenvolvido é composto por cinco dispositivos principais: o inversor de frequência, o microprocessador, o filtro, um computador e a carga. Todos os dispositivos já existiam no laboratório da universidade, não tendo sido necessário o desembolso de recursos.

De forma resumida, o inversor substituirá o aerogerador (turbina + gerador), sendo que o inversor receberá sinais de comando entregues pelo sistema de controle. Uma tensão *PWM* é disponibilizada em sua saída e foi empregada para alimentar a carga, após passar por um filtro LC para garantir a qualidade da tensão gerada. Todos os dados de entrada e saídas do inversor são controlados pelo conjunto de diretrizes (bloco de controle). Mediante as avaliações desses valores, decisões são tomadas e enviadas ao inversor que ajusta sua operação.

3.1.1 O inversor de frequência

Os inversores de frequência, também conhecidos como conversores de frequência, são normalmente destinados ao controle e variação de velocidade de motores elétricos. Conversores comerciais, disponíveis em grande variedade de tensão e corrente, usualmente convertem a tensão alternada senoidal em tensão contínua (*link CC*) através de uma ponte retificadora trifásica a diodos, e novamente a converte em tensão alternada, porém com amplitude e frequência variável, através de inversor trifásico a *IGBTs*. Para tal objetivo, o inversor trabalha com a modulação de onda quadrada através da função *PWM* (do inglês *Pulse Width Modulation*) (SEGUNDO e RODRIGUES, 2015). O esquema básico do circuito de potência interno ao inversor está mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Circuito de potência do inversor de frequência



Fonte: Adaptada de SEGUNDO e RODRIGUES (2015).

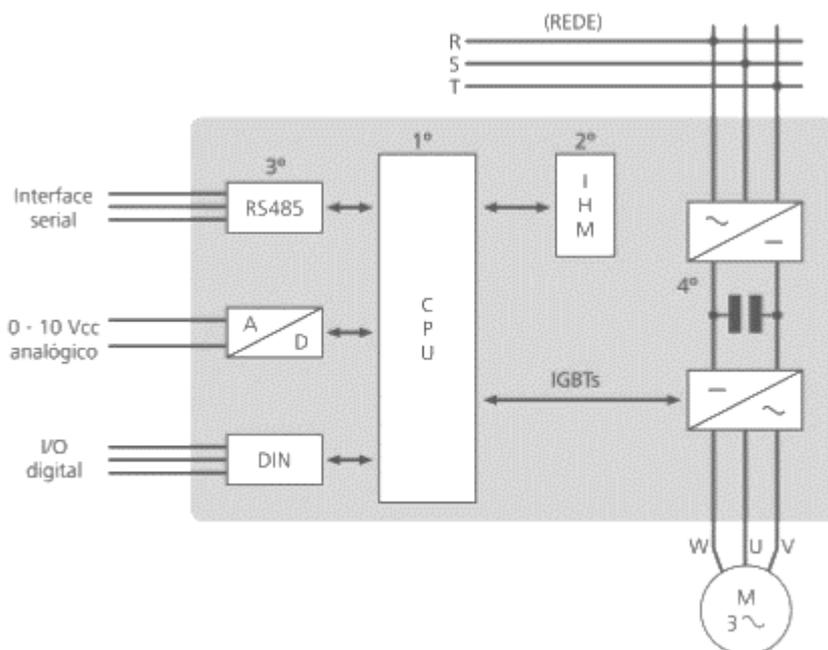
A velocidade de rotação de um motor é função proporcional da frequência de alimentação, assim, se há um aumento de velocidade de giro haverá um aumento na frequência de operação e vice-versa. O inversor possui entrada de alimentação normalmente ligada à rede elétrica, e uma saída que é usada para alimentar o dispositivo ou carga de interesse. As entradas e saídas de um inversor podem ser monofásicas ou trifásicas.

Além do controle de velocidade, os inversores de frequência geralmente apresentam um conjunto de parâmetros que podem ser empregados para realizar funções como: controle de corrente, de torque, controle escalar, controle V/F 60 Hz, controle V/F ajustável, controle vetorial, controle de aceleração e frenagem, funções de Gira / Para ou Habilita / Desabilita, entre outros, e pode ser comandado de forma remota ou local.

Os principais componentes funcionais de um inversor estão mostrados pelo diagrama de blocos da Figura 12. A entrada de potência de alimentação do inversor é realizada pelo conjunto de terminais R, S e T, e as saídas de potência que alimentam a carga ou outro dispositivo são os pinos U, V e W.

No 1º bloco está representado o processador ou microcontrolador, que é responsável pela inteligência do inversor. É nele que ocorre o processamento dos dados adquiridos nos diversos terminais analógicos e digitais gerando os pulsos de saída através de lógicas implementadas para disparo dos *IGBTs*; é nele também que ficam armazenados os valores de todos os parâmetros existentes no inversor, esse bloco é denominado de *CPU*.

Figura 12 – Diagrama de blocos dos principais componentes internos ao inversor



Fonte: Adaptada de SEGUNDO e RODRIGUES (2015).

No 2º bloco tem-se a interface homem-máquina composta por um *display* digital (da sigla IHM), esse *display* apresenta de forma simples todos os parâmetros do inversor, por ele pode-se apenas ler ou modificar parâmetros (desde que o inversor esteja pré-programado para isso). Por esse *display*, é possível verificar os valores dos parâmetros naquele momento, como corrente, torque, tensão, tensão *link* CC, frequência, velocidade, valores de saídas e entradas analógicas ou digitais (SEGUNDO e RODRIGUES, 2015).

No 3º bloco estão representados todos os componentes responsáveis pelas diversas formas de comunicação que o inversor pode exercer. Por ele pode ser feita a comunicação serial via RS232 ou RS485 (depende do modelo do inversor), para isso é necessário o adaptador compatível à porta IHM. São também disponibilizados os terminais de entradas e saídas com sinais analógicos, os terminais digitais e os relés de contato presentes nas configurações normalmente fechado (NF) e normalmente aberto (NA).

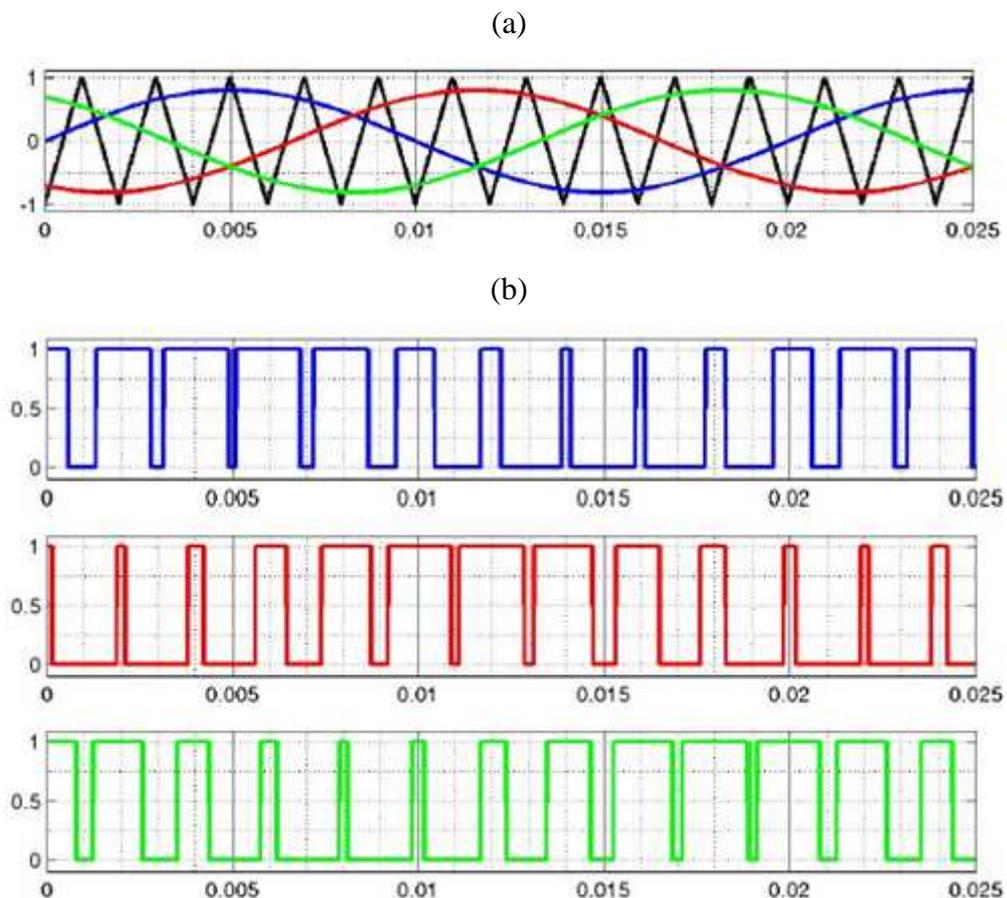
Já no 4º bloco são apresentados os circuitos conversores de potência descritos anteriormente.

O inversor de frequência, através da modulação *PWM* codifica digitalmente níveis de sinais analógicos. Nesta técnica o ciclo de trabalho de uma onda quadrada é modulado a fim de

codificar um nível de sinal analógico desejado. A alimentação CC (*link* CC do inversor) é totalmente ligada ou desligada de forma que a tensão entregue à carga ocorra por meio de uma série de comandos (impulsos) de ligar e desligar.

O fator determinante é o tempo ao qual a alimentação permanece ligada (alimentado a carga) e o tempo que permanece desativada. Para cada valor analógico desejado há uma largura de pulso específica codificada em *PWM*. Dessa forma, a tensão entregue à carga é uma série de pulsos de tensão contínua, modulados por uma onda senoidal. A frequência de chaveamento é denominada frequência de comutação, e normalmente é utilizada na ordem de kHz. A Figura 13 apresenta, de forma gráfica, a modulação de uma onda quadrada para se obter o valor de tensão desejado. A senóide de referência é comparada com uma onda triangular na frequência de chaveamento, gerando os sinais de comando dos IGBTs do inversor. Na Figura 13 (a) tem-se a onda portadora, cor preta, e tensões de referência V_a (azul), V_b (vermelha) e V_c (verde) e em (b) as tensões trifásicas sintetizadas.

Figura 13 – Modulação através da função PWM

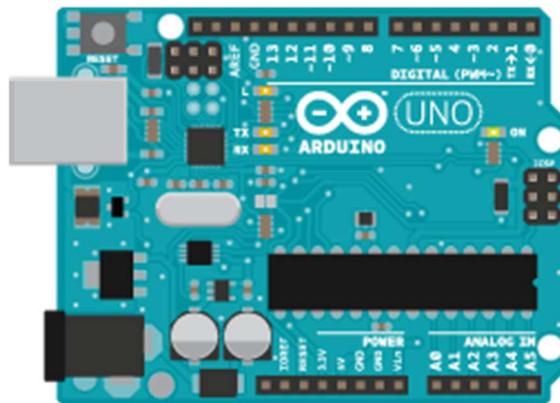


3.1.2 O Arduino

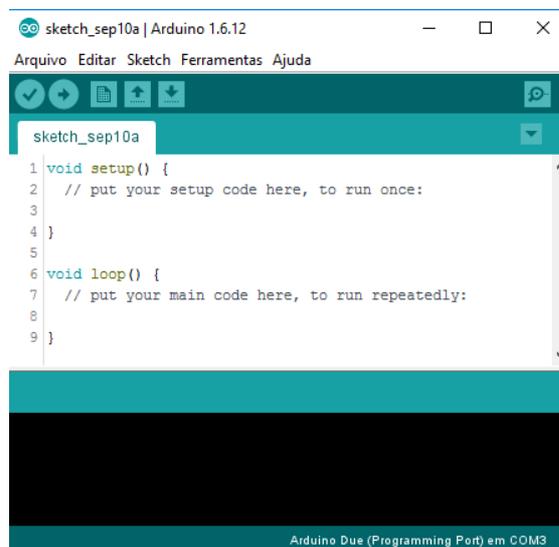
O Arduino é uma placa microprocessada usada para prototipagem rápida. Trata-se de uma ferramenta acessível, de baixo custo e flexível. Pode ser utilizado em plataformas independentes ou ser hospedado em um computador. A placa é basicamente constituída pelo processador, terminais de entradas e saídas analógicas e digitais, interface *USB* ou serial. O microprocessador presente na placa é o *Atmel AVR* de 8 bits que processa os dados lidos e os traduz em saídas ativando os equipamentos desejados. As instruções são codificadas em linguagem de programação através da interface *IDE* (*software* Arduino). Usa-se a função monitor serial para imprimir na tela os valores das variáveis lidas ou calculadas. Tem-se na Figura 14 (a) a placa Arduino típica e na Figura 14 (b) tem-se a interface *IDE* (ARDUINO, 2017).

Figura 14 – (a) Modelo de placa Arduino e (b) *IDE*

(a)



(b)



Fonte: produção do próprio autor (2017).

3.1.3 A carga

A carga a ser alimentada pelo sistema é uma das variáveis que determinará o ponto de operação do sistema juntamente com a variável velocidade do vento. A carga dita a corrente entregue pelo inversor. Neste trabalho, definiu-se o uso de uma carga estática trifásica resistiva que será especificada no Capítulo 4.

3.2 Estratégia de controle

O sistema de controle é fundamental para o funcionamento adequado do sistema estático desenvolvido, permitindo que os dispositivos selecionados se comportem dentro das premissas desejadas e garantindo a qualidade da operação do experimento. No controle estão presentes todos os parâmetros, condicionantes, limites, e a lógica de operação necessários para que o sistema opere dentro das faixas requeridas e emule fielmente o sistema real.

O controle da bancada estática acontece de duas formas, sendo que a primeira parte trata da parametrização do inversor, etapa fundamental para que o equipamento esteja nas condições necessárias de operação conforme modelo adotado. Aqui foram definidas premissas importantes para o funcionamento do sistema emulado (turbina / gerador) de forma realista. A segunda etapa do controle é composta pelo conjunto de definições (lógica implementada) embarcadas em um processador.

O sistema de controle é usado para determinar a potência operacional do gerador (GSIP) baseado na geração de energia dada pela turbina eólica selecionada. Como não é possível armazenar o recurso vento, faz-se necessário garantir as condições mínimas de operação da turbina para se aproveitar ao máximo a energia potencial eólica. Para situações de vento com velocidade inferior ou superior à faixa de operação, é necessário um controle para garantir o funcionamento completo e seguro do sistema, e nesses intervalos extremos o sistema é desacoplado e deixado em modo espera.

Uma das formas de controle de potência existentes, além das formas habituais citadas no item 2.1 do Capítulo 2, é quando a velocidade do vento incidente sobre as lâminas e o ângulo de

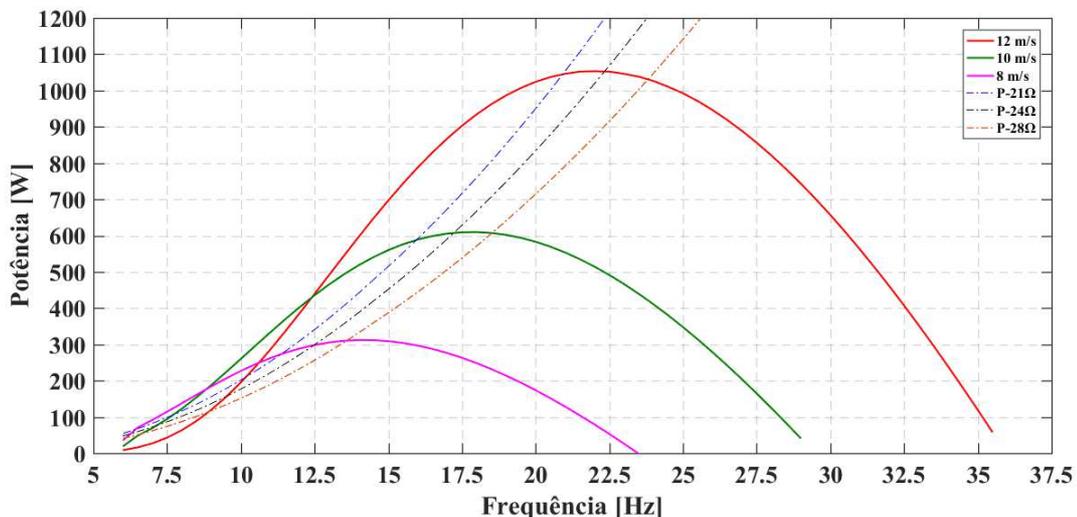
passo (β) tem seus valores fixados, ou seja, constantes. Ao variar a velocidade de giro do rotor do gerador, a frequência de operação é variada, e assim também ocorre a variação da potência entregue e o controle se torna possível, uma vez que a velocidade angular do gerador síncrono é representada pela Equação (9) (OLIVEIRA, 2016).

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (9)$$

Como C_p é dado em função de λ (Equação 5), que por sua vez é uma função de ω (Equação 9), a variação da velocidade angular permite que a potência extraída do sistema seja variada. Para cada velocidade do vento incidente nas lâminas, existe um perfil de curva de potência característica, visto que a potência extraída de uma turbina é dada em função do vento (Equação 3).

As curvas apresentadas na Figura 15 mostram o perfil de potência para diversas velocidades de vento, considerando um GSIP de 1100 W. Ainda na Figura 15, está representada a curva de potência de uma carga (linha tracejada), que iguala a máxima potência da turbina apenas na velocidade nominal. Como pode-se observar, há pontos de intersecção entre as curvas de perfil de potência da turbina com a curva de potência demandada pela carga. Logo, para cada curva característica de potência da turbina existe um ponto de intersecção com a curva da carga. É esse ponto que determina a frequência de operação (ou velocidade angular) em que o sistema entrará em equilíbrio (OLIVEIRA, 2017).

Figura 15 – Curvas de potência da turbina e curva de carga



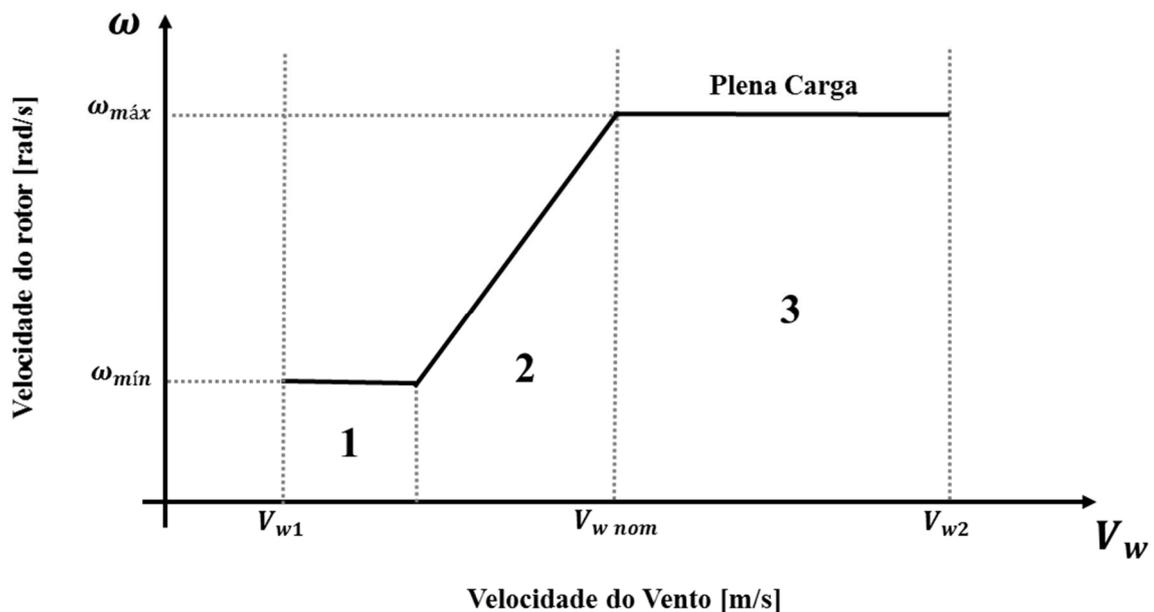
Fonte: produção do próprio autor (2017).

A Figura 15 mostra as curvas de potência características para ventos de 8, 10 e 12 m/s. Além disso, estão mostradas as curvas de potência para cargas resistivas de 21,2 Ω , 24,2 Ω e 28,3 Ω . Para cada carga tem-se uma potência de geração associada, na curva de 8 m/s e carga de 21,2 Ω esse ponto ocorre na frequência aproximada de 11,5 Hz com potência de 280 W. Quando analisado para a mesma carga e curva de vento de 10 m/s, tem-se um ponto de intersecção em 16 Hz com potência de 591 W. Já na curva de 12 m/s, esse ponto de equilíbrio ocorre em 21 Hz com potência de 1053 W. Portanto, à medida que a velocidade do vento aumenta a potência extraída também aumenta. Da mesma forma, à medida que a velocidade do vento incidente diminui, a potência extraída diminui.

Ao analisar a curva de vento de 8 m/s e ao variar a carga alimentada, percebe-se que o sistema busca um novo ponto de equilíbrio dado por uma nova frequência de operação. Ao elevar a carga de 21,2 Ω para 24,2 Ω , a frequência de operação é variada de 11,5 Hz para 12,5 Hz. O mesmo ocorre nas demais curvas, para ventos de 10 m/s a variação de carga de 24,2 Ω para 28,3 Ω elevou a frequência de operação de 21 Hz para 22,5 Hz.

Com base no comportamento dinâmico observado na Figura 15, pode-se resumir, como mostrado na Figura 16, as três etapas básicas do funcionamento operacional do sistema.

Figura 16 – Faixas de operação e controle da turbina eólica emulada



Fonte: produção do próprio autor (2017).

Na região 1 da Figura 16, enquanto a velocidade do vento não é suficiente para o sistema começar a funcionar, ele se mantém no modo de espera até o vento aumentar e possibilitar o início da operação na segunda região. Cabe observar, que devem ser respeitados os valores de velocidade mínima do vento para a operação do aerogerador. Na região 2, tem-se a área geradora do sistema turbina-gerador, buscando operar no ponto de equilíbrio de potência conforme exigido pela carga. No momento em que o sistema encontra o ponto de equilíbrio, ocorre a sua estabilização. O sistema permanece em equilíbrio até que ocorra uma nova perturbação, alterando a velocidade do vento ou aumentando ou diminuindo a carga. Sempre que a velocidade do vento ultrapassar o limite de operação segura ($\omega_{\text{máx}}$), a velocidade do rotor é mantida constante na potência nominal e a operação se mantém na região 3.

Na região 2, utilizou-se o controle de velocidade direta, cujo modelo é seguir a curva de potência em uma dinâmica mais rápida buscando o ponto de equilíbrio de acordo com a demanda de carga. Neste método, um controle de velocidade é implementado para rastrear o ponto de equilíbrio na curva de potência, de acordo com a velocidade do vento incidente na turbina. Os dados são obtidos em tempo real, onde a potência teórica da turbina-gerador (P_w) é calculada a partir da frequência imposta através das equações teóricas de vento previamente apresentadas no Capítulo 2, e comparada com a potência real do inversor. A potência real pode ser obtida de acordo com as informações que o inversor em uso disponibiliza. Na montagem realizada, o inversor disponibiliza em uma saída analógica a informação da corrente ativa entregue pelo inversor, (I_{inv}), que é adquirida pelo Arduino e utilizado na malha de controle. A potência do inversor, P_{inv} , calculada em tempo real, e é dada na Equação (10):

$$P_{\text{inv}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{inv}} \cdot V_{\text{inv}} \quad (10)$$

Onde,

P_{inv} : potência calculada do inversor [W];

I_{inv} : corrente medida do inversor [A];

V_{inv} : tensão imposta pelo inversor [V];

Se a potência obtida (P_{inv}) for maior do que a potência teórica (P_w), para um ponto de operação hipotético, há um aumento na velocidade angular do gerador representado pelo aumento na frequência de operação do inversor e, se for menor, há uma diminuição. Este processo se repete

até que a potência operacional seja igual ou aproximadamente igual à potência teórica esperada. Nessa condição, considera-se que o sistema entrou em estado estacionário. A margem de tolerância (erro) para esta emulação foi definida como 5% para mais ou menos do valor de potência teórica para o ponto de operação.

O sistema de controle é formado pela interface computador-Arduino, e implementado através de código em linguagem de programação. Através desse controle, o inversor é capaz de variar a velocidade de um gerador apenas transformando corrente e tensão CC em CA e, por conseguinte capaz de controlar a potência entregue à carga.

CAPÍTULO 4: O SISTEMA IMPLEMENTADO

Este capítulo descreve a implementação do Sistema Estático Desenvolvido com gerador síncrono a ímãs permanentes e com uso do inversor de frequência de forma a reproduzir o comportamento dinâmico e em regime de uma turbina eólica. Descreve-se todos os equipamentos selecionados, principais características, parametrizações utilizadas, premissas de funcionamento e controle empregado.

4.1 Seleção e configuração dos equipamentos

A premissa para selecionar os equipamentos foi utilizar-se de dispositivos já existentes nos laboratórios da universidade. Assim, foi feita uma ponderação entre os dispositivos (inversores, filtros, geradores e cargas) já utilizados nos laboratórios com valores de especificação de turbinas existentes comercialmente. Diante dessa análise, a turbina escolhida foi compatível com os equipamentos sem a necessidade de custos adicionais. No Quadro 2, descreve-se as especificações da turbina eólica emulada.

Quadro 2 – Especificações dos elementos da Turbina Eólica

Características	Valor
Tensão nominal	220 V
Potência nominal	1000 W
Velocidade de vento nominal	12 m/s
Velocidade de vento mínima	3 m/s
Velocidade de vento máxima	25 m/s
Velocidade nominal do rotor	430 rpm
Diâmetro da turbina	2,80 m
Área de varredura das pás	6,16 m ²
Tipo de eixo	Vertical

Fonte: produção do próprio autor (2017).

Optou-se pela escolha de um gerador síncrono à ímã permanente (GSIP), com potência e tensão de operação compatíveis com a turbina escolhida e com o inversor utilizado. Foi selecionado um gerador de 1,5 CV (1100 W) cujas principais características estão descritas no Quadro 3.

Quadro 3 – Especificações dos elementos do GSIP

Características	Valor
Tensão nominal	220 V
Potência nominal	1100 W
Corrente nominal	2,7 A
Velocidade síncrona	7200 rpm
Número de polos	8
Frequência síncrona	120 Hz

Fonte: produção do próprio autor (2017).

O inversor utilizado foi o CFW09, da fabricante WEG. É um equipamento de elevado desempenho e proporciona o controle de velocidade e torque de motores. Possui entradas e saídas analógicas e digitais de diversas grandezas, características fundamentais para facilitar a comunicação com os demais dispositivos. Permite visualização dos principais parâmetros pelo *display* de interface homem máquina (IHM). No Quadro 4 estão descritas as principais características do inversor selecionado.

Quadro 4 – Principais características do Inversor WEG CFW09

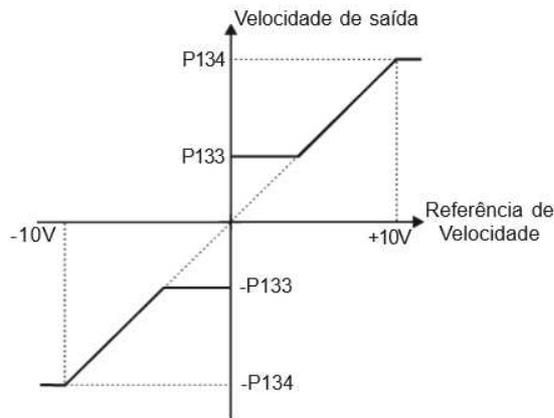
Características	Valor
Tensão nominal	220/230 V
Potência nominal	16000 W
Corrente nominal	28 A
Tensão do link DC	300 V
Frequência de chaveamento	5 kHz
Versão de software	3.73

Fonte: produção do próprio autor (2017).

No inversor CFW09, os parâmetros de P001 à P099 são apenas de leitura não podendo ser alterados, ficando disponíveis para visualização através do *display* (IHM). Eles podem ser consultados a qualquer momento estando o inversor em operação ou não. Os parâmetros de P100 à P199 são parâmetros de regulação, além de serem ajustáveis eles podem ser utilizados pelas funções internas do inversor. De P200 à P399 são parâmetros de configuração e definem as características do inversor, as funções a serem executadas, as funções de entradas e saídas do cartão de controle. De P400 à P499 são os parâmetros referentes ao motor ou ao gerador. Os parâmetros de P520 à P536 se referem às funções especiais e não foram utilizados neste trabalho (WEG, 2006).

No bloco de parâmetros de regulação houve a configuração dos parâmetros P133 e P134 que definem os valores mínimo e máximo de velocidade quando inversor é habilitado. Essa parametrização foi baseada na faixa de frequência de operação real do gerador, com a frequência mínima de 7,5 Hz e a máxima de 30 Hz, sendo seus equivalentes em velocidade de 360 e 7200 rpm. Na Figura 17 está representado o gráfico de referência dos valores de P133 e P134 relacionados com a faixa de operação das entradas analógicas (0 a 10 V).

Figura 17 – Curva da velocidade de saída em função da referência de velocidade do Inversor CFW09



Fonte: Manual CFW09 WEG.

Os parâmetros P142 à P146 estão relacionados com as características do controle V/F ajustável. Esses parâmetros permitem alterar as curvas V/F padrões. Eles podem ser utilizados para obter curvas quadráticas ou curvas de motores com tensões e frequências nominais diferentes do convencional e conseqüentemente, podem adaptar o fluxo de magnetização do motor. Essa função é habilitada no parâmetro P202 que será detalhado ainda nesse capítulo.

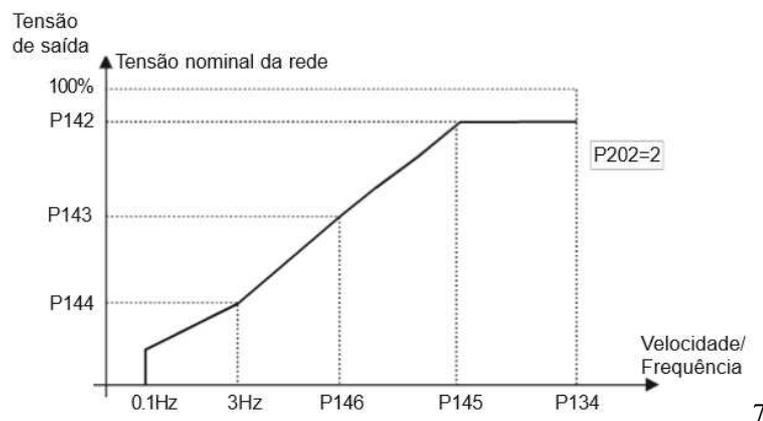
O parâmetro P142 foi ajustado em 95,5%, o P143 em 47,7% e o P144 em 5%, esses ajustes foram realizados para adequar os valores máximos e mínimos de operação. Para a frequência de 7,5 Hz, tem-se a tensão mínima de operação e o inversor trabalha em 46V e, para a frequência máxima 30Hz, o inversor trabalha com 210 V. Os parâmetros P145 e P146, velocidade de enfraquecimento de campo e intermediária, foram mantidos com o ajuste de fábrica em 1800 e 900 rpm respectivamente.

Na Figura 18 é possível observar como é formada a curva pelo controle de V/F ajustável. Essa modalidade de controle foi fundamental para que o Sistema Estático Desenvolvido operasse dentro dos limites desejados. Cabe destacar que, para se obter a frequência variando de 7,5 Hz

a 30 Hz o inversor foi programado com limite de 120 Hz, valor que não se enquadra no padrão estabelecido nas regras de controle V/F tradicionais (50 ou 60 Hz) existentes no inversor.

O parâmetro P142 foi ajustado em 95,5%, o P143 em 47,7% e o P144 em 5%, esses ajustes foram realizados para adequar os valores máximos e mínimos de operação. Para a frequência de 7,5 Hz, tem-se a tensão mínima de operação e o inversor trabalha em 46V e, para a frequência máxima 30Hz, o inversor trabalha com 210 V. Os parâmetros P145 e P146, velocidade de enfraquecimento de campo e intermediária, foram mantidos com o ajuste de fábrica em 1800 e 900 rpm respectivamente.

Figura 18 – Curva da tensão de saída em função da referência de velocidade/frequência do inversor CFW09



Fonte: Manual CFW09 WEG.

Os principais parâmetros utilizados no bloco configuração, estão descritos a seguir. O parâmetro P202, o qual define a forma de controle do comportamento do inversor. Para o sistema em estudo foi utilizado o controle V/F ajustável (cujos principais parâmetros relacionados foram descritos anteriormente). Os parâmetros de P220 à P228 definem algumas variáveis como ajuste local ou remoto. O parâmetro P220 foi habilitado como IHM para possibilitar alguns ajustes de parâmetros através do *display* IHM. Os parâmetros P221 e P222 foram definidos em 1, e correspondem a referência local e remota, tendo sido selecionada a entrada AI1. Os parâmetros P224 e P227 foram definidos em 1 para habilitar o comando Gira / Para local ou remoto em uma entrada digital (DIx). O parâmetro P232 foi configurado para frenagem por inércia.

As parametrizações das entradas analógicas podem ser realizadas através dos parâmetros de P234 à P248. Nesse estudo fez-se uso apenas de uma entrada analógica AI1, no qual o

parâmetro P234 corresponde ao ganho da entrada, enquanto que o parâmetro P235 corresponde ao sinal da entrada AI1 e foi ajustado em 0 (cuja referência de tensão pode ser estabelecida entre a faixa de 0 a 10v (ou 10 V) / 0 a 20ma (ou 20 mA). O parâmetro P236 define o *offset* da entrada AI1, e foi ajustado em -5,5 de forma a eliminar o valor de offset da porta DAC0 do Arduino Due (aproximadamente 0,54 V).

A configuração da saída analógica foi realizada através dos parâmetros P251 e P252 onde utilizou-se apenas a saída AO1. O parâmetro P251 foi configurado para informar a corrente de saída do inversor, valor de ajuste em 5, enquanto que o parâmetro P252, referente ao ganho de saída de AO1, foi ajustado em 1. Foi utilizado também uma única porta de entrada digital, a entrada DI1, cuja função é habilitar a função Gira / Para, é por ela que se informa ao inversor os limites de operação (velocidade de vento incidente nas pás). Neste caso, o valor ajustado do parâmetro P263 foi ajustado em 1 (função Gira / Para).

As resoluções das portas digitais de comunicação são de 11 bits, ou seja, para um valor de 0 V o valor corresponde em binário também é 0 e, para o valor de 10 V o valor corresponde é 1023.

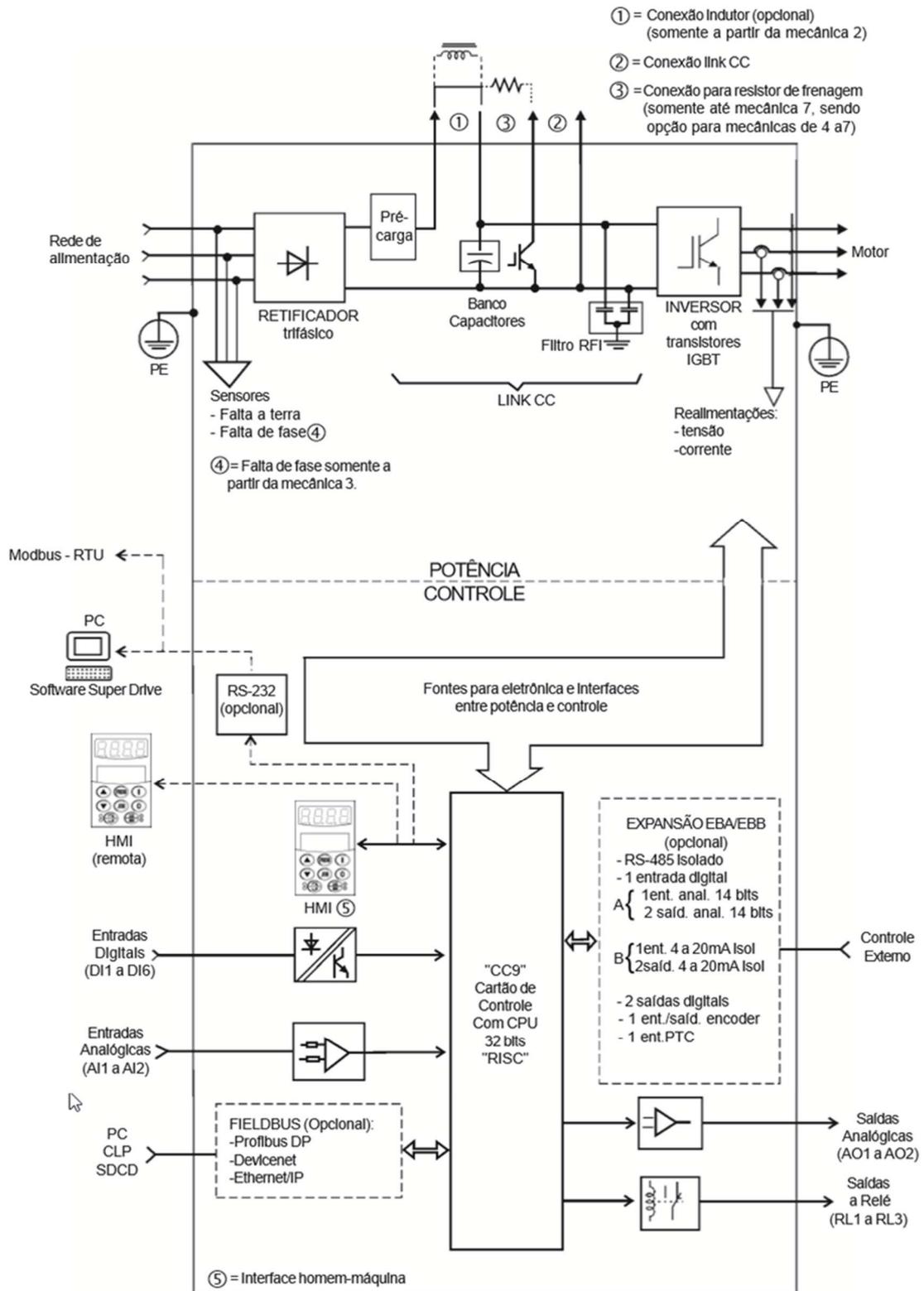
Nos parâmetros P295, P296 e P297, informa-se os principais dados do inversor utilizado. Esses valores são as referências internas para cálculo das variáveis mostradas pelos parâmetros de leitura (P000 à P100). A corrente do inversor é informada no parâmetro P295 (28 A), a tensão é informada no parâmetro P296 no ajuste 0 (220/230V), e a frequência de chaveamento adotada foi de 5 kHz definida no parâmetro P297. O parâmetro P312 define o protocolo serial para comunicação e foi definido o Modbus-RTU 9600 bps, sem paridade.

Nos parâmetros P400, P401, P402, P403 e P404 foram inseridas as principais características nominais do gerador a ser emulado, respectivamente: tensão, corrente, velocidade, frequência e potência, sendo os valores de ajustes 220 V, 2,7A, 7200 rpm, 120 Hz e 4 (1,5 CV / 1100 W), os quais, estão descritos no quadro 3. Todos os demais parâmetros foram mantidos com as configurações de fábrica.

A Figura 19 mostra o diagrama de blocos dos circuitos de potência e controle do CFW09. Como pode-se verificar, o diagrama de blocos da Figura 19, mostra de forma simplificada o circuito

de potência do inversor, o sistema de controle, as portas de entradas e saídas analógicas e digitais e demais dispositivos.

Figura 19 – Diagrama do inversor CFW09



Fonte: Manual CFW09 WEG.

A Figura 20 mostra uma fotografia do modelo do inversor utilizado.

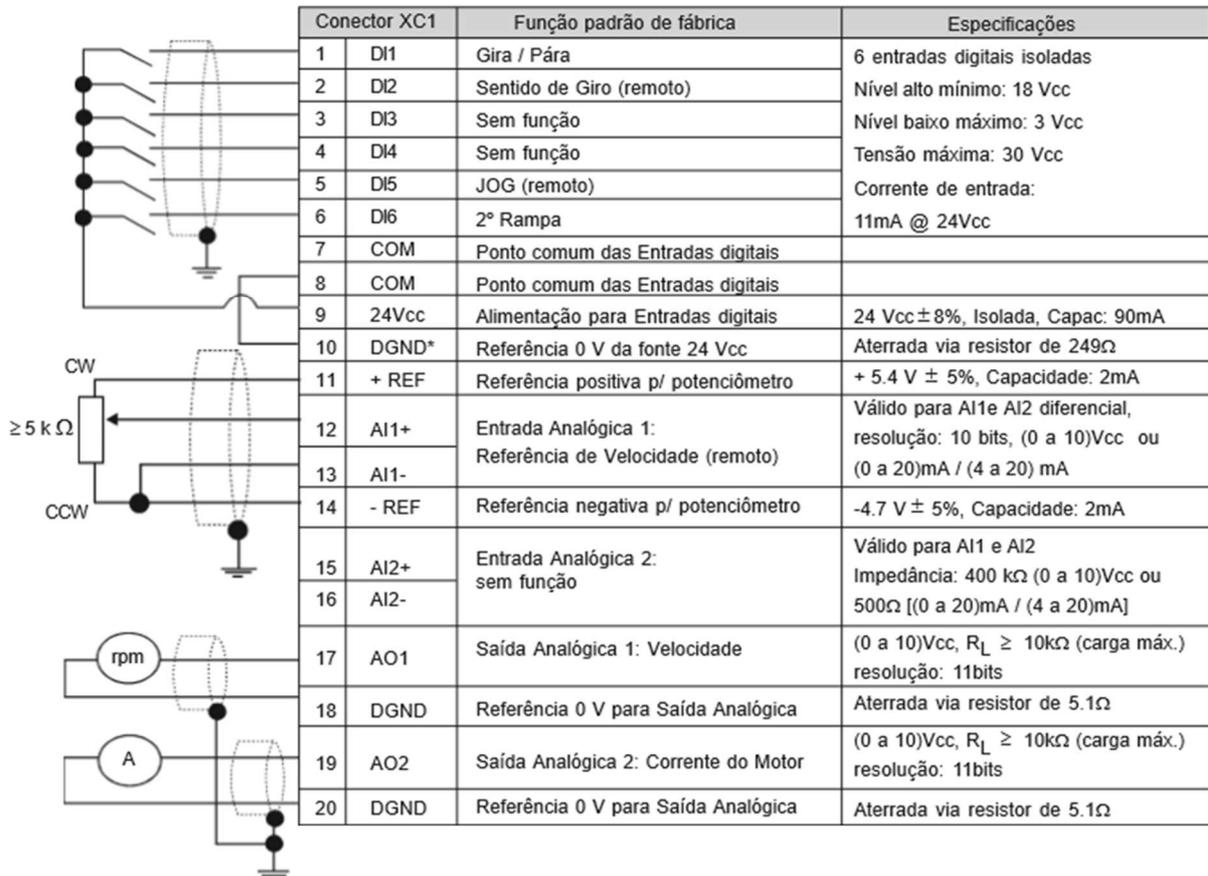
Figura 20 – Inversor CFW09 da WEG



Fonte: WEG (2017).

Na Figura 21 mostra o diagrama de entradas e saídas analógicas e digitais do inversor CFW09, com as respectivas especificações de operação.

Figura 21 – Diagrama de entradas e saídas analógicas e digitais do inversor CFW09



Fonte: Manual CFW09 WEG.

Para facilitar o controle do sistema, foi utilizado a plataforma microprocessada Arduino, a qual possibilitou a comunicação através de portas analógicas e digitais de uma forma bem prática. O uso do microcontrolador possibilitou implementar o modelo conceitual da turbina que serviu de referência para a malha de controle utilizada. O controle do sistema foi implementado em linguagem de programação C++.

O microcontrolador utilizado foi o Arduino Due, cuja placa é mostrada na Figura 22. Tal placa microcontrolada opera com tensão máxima de operação de 3,3 V, o que difere da maioria placas microcontroladas, que em geral, operam com tensão de 5V (ou 5 V).

O Arduino Due possui processador Atmel SAM3x8E ARM Cortex-M3 32bits, contém 54 terminais digitais (entre entradas e saídas) e destaca-se 2 DAC (conversor digital para analógico).

Figura 22 – Placa do Arduino Due



Fonte: Arduino (www.arduino.cc).

A saída analógica DAC0 foi utilizada para enviar ao inversor o comando com os valores de frequência / velocidade de operação. A porta D1 foi definida como saída e utilizada para comandar a função Gira / Para do inversor, e a porta A0 foi definida para realizar a leitura do valor de corrente do inversor. O Quadro 5 apresenta o resumo da comunicação do tipo De / Para do Arduino / Inversor.

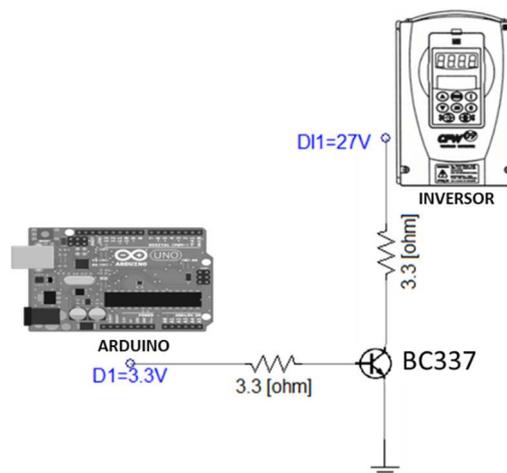
Quadro 5 – o resumo da comunicação do tipo De / Para do Arduino / Inversor.

Inversor	Arduino
Borne 01: DI1	D1
Borne 12: AI1+	A0
Borne 13 e 20	GND
Borne 17: AO1	DAC0

Fonte: produção do próprio autor (2017).

Para ajustar os níveis de sinais entre os dois dispositivos, foi necessário o emprego de um circuito externo com característica *Pull-Up*, o qual converte o nível de tensão para ajustar os intervalos de operação entre os dois dispositivos e possibilita a comunicação, como mostrado na Figura 23. A saída digital do Arduino apresenta limitação em 3,3 V e a entrada digital do inversor atua na faixa de 3 V (para nível lógico baixo) e 18 V (nível lógico alto), com limite em 30 V. Dessa forma, esse circuito permitiu que a tensão de saída do Arduino operasse na faixa necessária para os dois níveis, baixo e alto. A tensão medida na porta digital DI1 do inversor foi de 27 V e com isso o circuito foi modelado com base nesse valor de tensão.

Figura 23 – Diagrama do circuito Pull Up



Fonte: produção do próprio autor (2017).

O filtro de potência utilizado foi um módulo da bancada Labvolt (produto da Festo Didactic¹), modelo 8326-00 mostrado na Figura 24. Trata-se de um filtro trifásico passivo passa baixa LC, composto por três indutores e quatro capacitores. Os acessos ao filtro ocorrem através de bornes

¹ Festo Didactic é líder mundial em fornecimento de equipamentos e soluções no que diz respeito à tecnologia educacional. (www.labvolt.com).

de contato de fácil utilização. O filtro foi disposto o mais próximo possível à saída de potência do inversor conforme recomenda o fabricante.

Figura 24 – Módulo do filtro passa baixa LC



Fonte: Labvolt (2017).

Utilizou-se uma carga trifásica resistiva composta por módulos independentes do fabricante Labvolt, cujo modelo é o 8311-00. Cada módulo é formado por um conjunto de nove resistências dispostas em três subconjuntos idênticos (um para cada fase), composto por três resistores (300 Ω , 600 Ω e 1200 Ω) e todos conectados em paralelo. Os mesmos podem ser ligados em simultâneo ou não de forma a variar o valor de resistência. Na Figura 25 tem-se mostrada o módulo resistivo Labvolt.

Figura 25 – Carga resistiva Labvolt

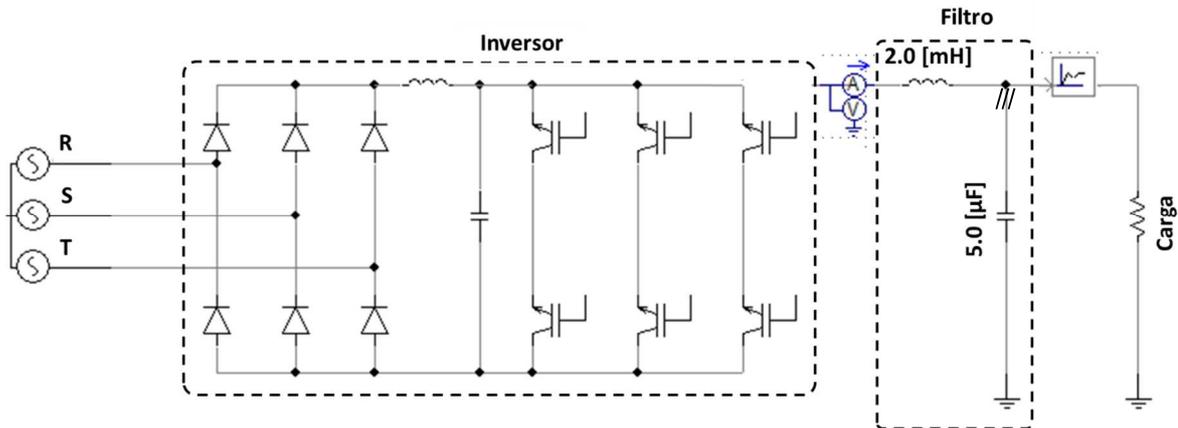


Fonte: Labvolt (2017).

A Figura 26 mostra o diagrama simplificado do circuito de potência do com emprego do Sistema Estático Desenvolvido que utiliza os seguintes elementos: inversor, filtro trifásico e a

carga resistiva. As medidas de tensão e corrente obtidas através das portas analógicas e digitais pelo Arduino são simbolicamente mostradas pelo multímetro inserido entre o inversor e filtro. Um osciloscópio foi utilizado para obter a forma de onda da curva de tensão sobre a carga.

Figura 26 – Diagrama simplificado do circuito de potência da Sistema Estático Desenvolvido



Fonte: produção do próprio autor (2017).

4.2 Arquitetura de controle

O controle da operação do Sistema Estático Desenvolvido estática foi implementado em um programa na linguagem C++, sendo utilizado interface *IDE* do Arduino. O programa implementado se baseia nos seguintes itens: estrutura, variáveis e funções. A plataforma de programação permite a comunicação serial através da porta *USB* do computador com a placa do Arduino, para isso foi utilizado a taxa de comunicação de 9600bps.

O inversor CFW09 permite a leitura de dados importantes e que foram utilizados para realizar o controle do Sistema Estático Desenvolvido. Dentre os mais importantes destaca-se a velocidade real, a corrente de torque, a corrente de saída, a potência, o torque no motor e tensão de saída. Esses dados podem ser obtidos a partir das saídas analógicas do inversor, através dos parâmetros de saída ou serem acessados diretamente pela interface IHM.

O fluxograma da estratégia de controle está mostrado na Figura 27. A primeira etapa consiste na parametrização inicial do programa. Nesta etapa são informados os valores iniciais das constantes de R , ρ e β , além do valor do vento incidente, o valor inicial da frequência de operação e a velocidade do rotor.

A segunda etapa trata-se da operação. Inicialmente verifica-se a velocidade do vento incidente às pás da turbina (V_w : velocidade do vento). Se a velocidade do vento for menor do que 3 m/s ou maior que 25 m/s (inversor operando com frequência menor que 7,5 Hz e maior do que 30 Hz), é enviado ao inversor um comando de desabilita geral (função “Para”), fazendo com que o inversor fique em modo de espera. O inversor permanece nesse estado enquanto o valor de vento não entra na faixa de operação. Quando o vento atinge valores entre 3 e 25 m/s (ou seja, o inversor poderá operar nas frequências entre 7,5 e 30 Hz) um comando de habilita geral (função “Gira”) é enviado ao inversor. Esse comando trafega pelas portas D1 do Arduino e DI1 do inversor, onde o nível lógico alto “*High*” é a função “Para” e o nível lógico “*Low*” é a função “Gira”.

Na sequência é calculado o valor da potência turbina (P_w), com base nas Equações (3), (5), (6) e (7) do Capítulo 2. Esse valor, que é função da velocidade do vento incidente nas pás (V_w) e da velocidade angular (ω), é utilizado como referência de controle. Depois dessa etapa, se realiza a leitura do valor da corrente do inversor. Foi necessário utilizar um filtro, implementado de forma digital, para eliminar os ruídos provenientes das variáveis obtidas. O valor digital correspondente à corrente do inversor, e disponibilizado pelo filtro digital, é convertido de binário para decimal. A partir do valor da corrente do inversor, se determina a potência do inversor (P_{inv}), com base na Equação (10). Se a potência do inversor for menor do que 95% da potência da turbina, o inversor recebe um incremento na frequência de operação. Com isso, a velocidade angular é calculada e atualizada e o sistema volta ao início da segunda etapa.

Se a potência do inversor se encontra entre 95 e 105% da potência da turbina, ficam mantidas tanto a frequência de operação do inversor como a velocidade do rotor, e inicia-se novamente o ciclo retornando ao início da segunda etapa.

Por fim, se a potência do inversor for maior do que 105% da potência da turbina, a frequência de operação é diminuída, a velocidade do rotor é recalculada e inicia-se novamente a segunda etapa.

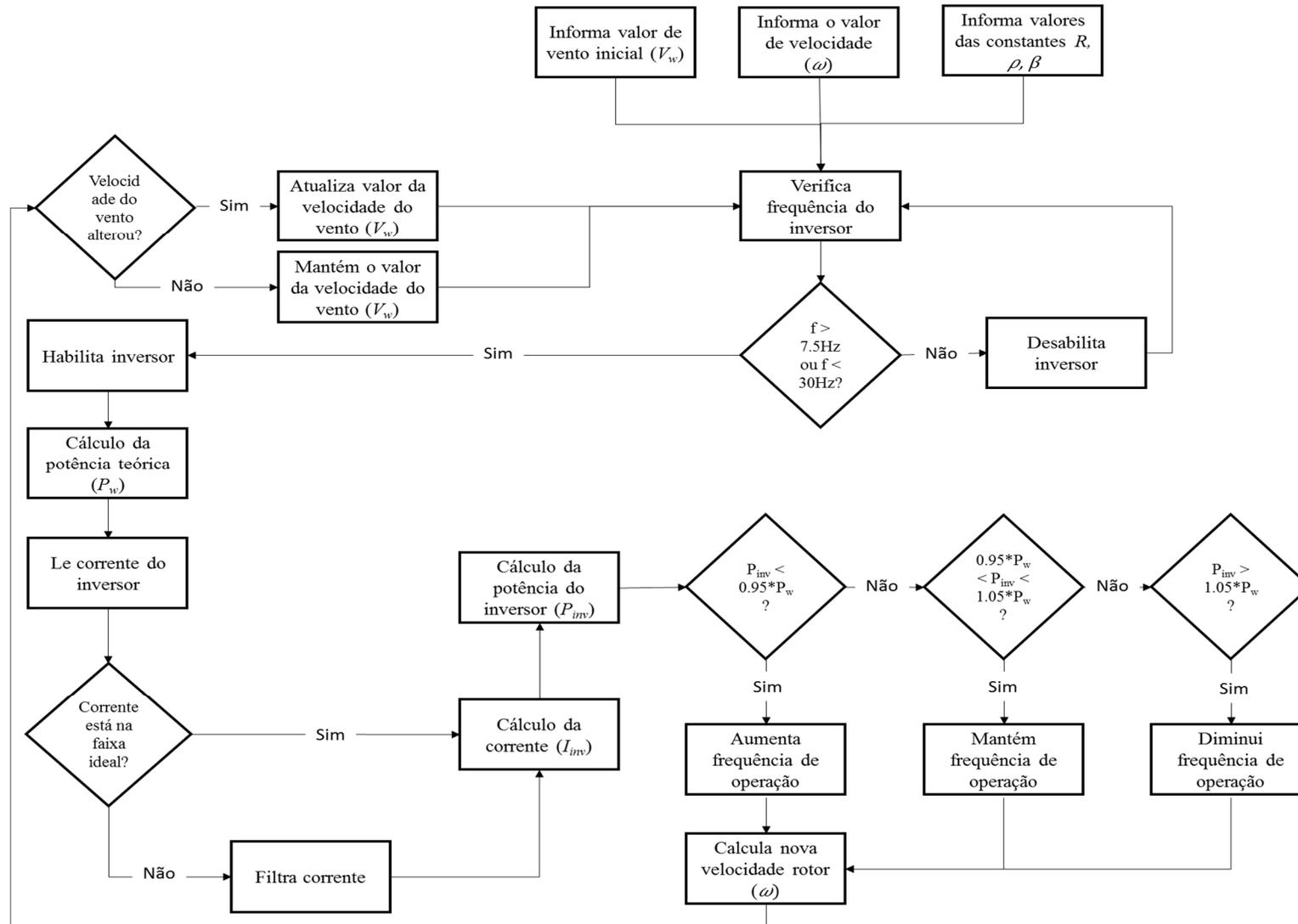
Antes do fim de cada ciclo de operação a velocidade do vento é verificada. Se a velocidade do vento incidente sofrer alterações, a variável correspondente a este valor é atualizada, caso contrário permanece com o valor anterior.

O controle emprega duas malhas que utilizam, de forma comum, a referência de velocidade de rotação do rotor (ou frequência de operação).

A variação do vento incidente é uma perturbação externa que faz com que o sistema busque um novo ponto de equilíbrio. Quando o vento aumenta, a frequência de operação do inversor deve também aumentar. Caso o vento enfraqueça, a frequência de operação deve ser reduzida. Quanto maior a velocidade do vento incidente, maior é a potência gerada.

Outra perturbação relevante é quanto há variação da carga alimentada, ou seja, quando a carga aumenta ela exige do sistema uma maior corrente a ser disponibilizada pelo inversor, o que resulta em uma maior potência. Assim, novamente o conjunto emulado busca o novo ponto de operação.

Figura 27 – Fluxograma da estratégia de controle



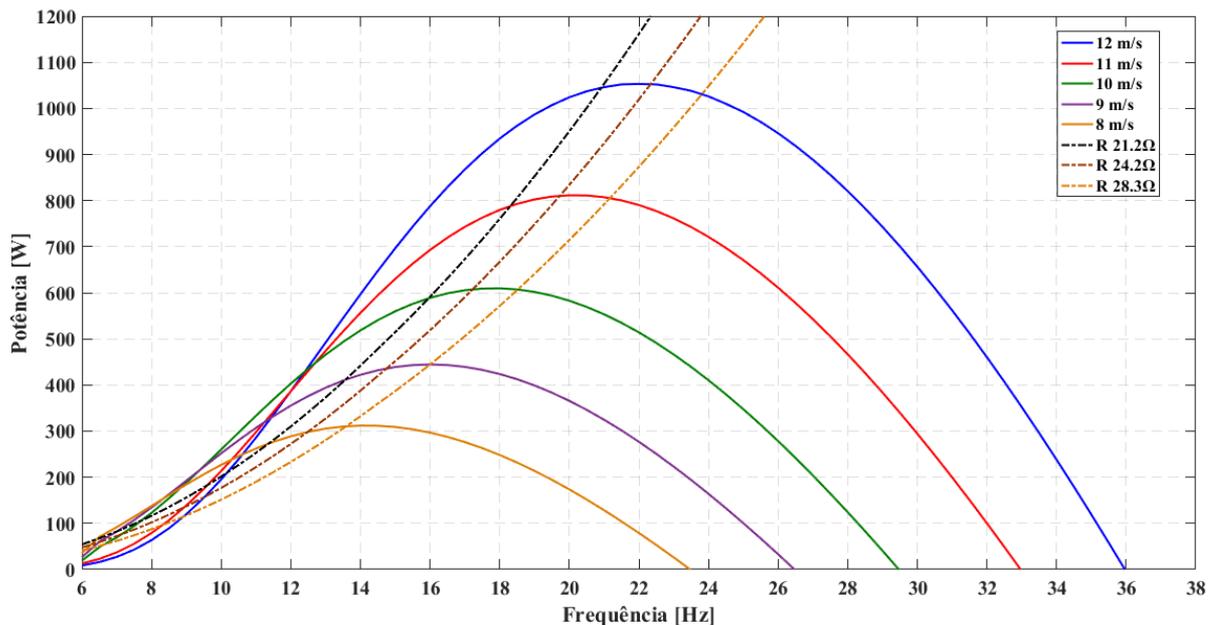
Fonte: produção do próprio autor (2017).

4.3 Resultados obtidos

Apresentam-se os resultados obtidos através das emulações do Sistema Estático Desenvolvido para alguns cenários de vento incidente e carga alimentada. Para a geração das curvas mostradas a seguir utilizou-se o *software* Matlab.

A Figura 28 mostra a dinâmica implementada através de programação na plataforma Arduino com base nas equações descritas no Capítulo 2. As curvas de perfil de potência da turbina emulada são apresentadas assim como as curvas de potência das cargas utilizadas para determinados valores de vento e carga. Para a turbina utilizada na emulação, os valores do coeficiente C_p no ponto de potência máxima localizou-se sempre em torno de 0,44.

Figura 28 – Curvas de potência da turbina em função da carga



Fonte: produção do próprio autor (2017).

Os Quadros 6, 7 e 8 apresentam, de forma resumida, os valores teóricos esperados de potência e frequência de operação da turbina eólica selecionada para cada valor de vento incidente. Os quadros ilustram os valores para as cargas de 21,2 Ω , 24,22 Ω e 28,25 Ω respectivamente.

Quadro 6 – Principais resultados esperados para carga de 21,2 Ω

Velocidade do Vento [m/s]	Potência Carga [W]	Frequência [Hz]
8	280	11,5
9	406	13,5
10	592	16,0
11	805	18,5
12	1046	21,0

Fonte: produção do próprio autor (2017).

Quadro 7 – Principais resultados esperados para carga de 24,22 Ω

Velocidade do Vento [m/s]	Potência Carga [W]	Frequência [Hz]
8	299	12,5
9	435	14,5
10	605	17,0
11	812	19,5
12	1052	22,5

Fonte: produção do próprio autor (2017).

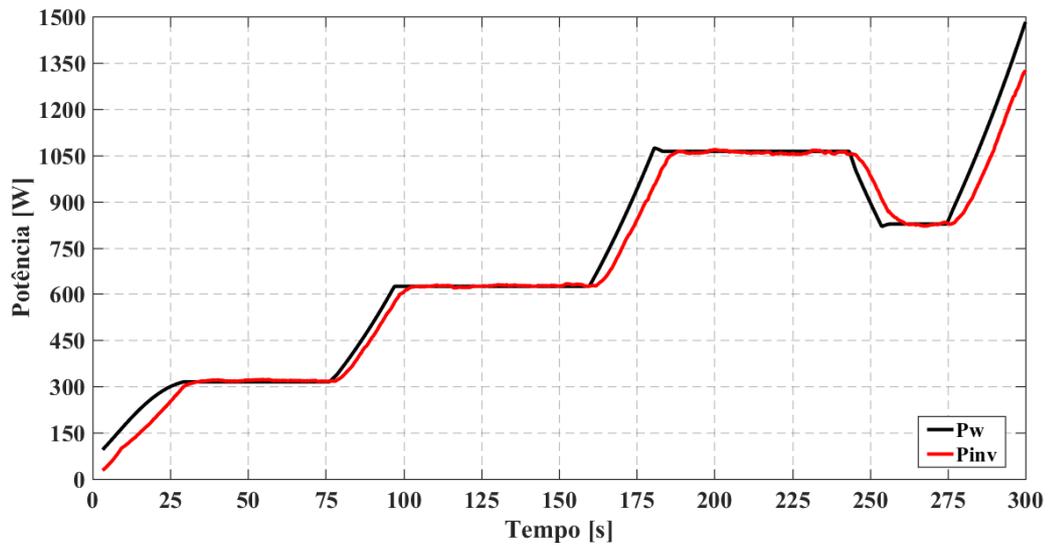
Quadro 8 – Principais resultados esperados para carga de 28,25 Ω

Velocidade do Vento [m/s]	Potência Carga [W]	Frequência [Hz]
8	325	13,95
9	453	16,0
10	612	18,95
11	805	18,5
12	1053	23,9

Fonte: produção do próprio autor (2017).

A Figura 29 mostra em detalhe um cenário de emulação com o sistema operando com carga resistiva constante de valor 24,22 Ω e com variação apenas do vento incidente. Houve quatro etapas de variação do vento, de 8 a 10 m/s, de 10 a 12 m/s, de 12 a 11 m/s e, finalmente, aumentando de forma constante. Pode-se observar que o inversor foi capaz de acompanhar a variação do vento com valores de potência entregues dentro da faixa tolerável de erro inferior a 5%. O tempo de resposta do inversor às variações de vento e como também a variação do ponto de operação foram satisfatórias e dentro da realidade.

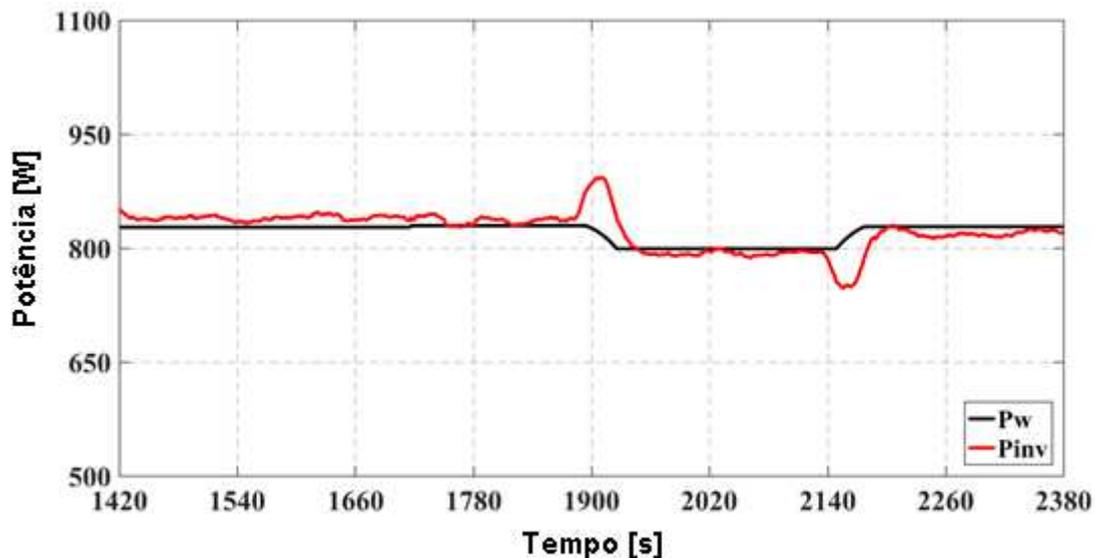
Figura 29 – Curvas de potência com carga resistiva constante igual a 24,22 Ω



Fonte: produção do próprio autor (2017).

A Figura 30 apresenta o resultado do sistema operando em um cenário com vento constante e carga variável. Para um vento de 11 m/s, a carga variou de 28,25 Ω a 24,22 Ω . Observa-se que, ao diminuir a resistência de carga, inicialmente a corrente aumenta o que gera um atraso no tempo de resposta do inversor. O mesmo ocorre quando o sistema retorna para operar com a carga inicial. No entanto, o inversor conseguiu acompanhar a variação de carga com valores de potência entregues dentro da faixa tolerável com erro inferior a 5% e tempo de atraso bastante consistente.

Figura 30 – Curvas de potência com velocidade de vento constante igual a 11m/s e carga resistiva variável



Fonte: produção do próprio autor (2017).

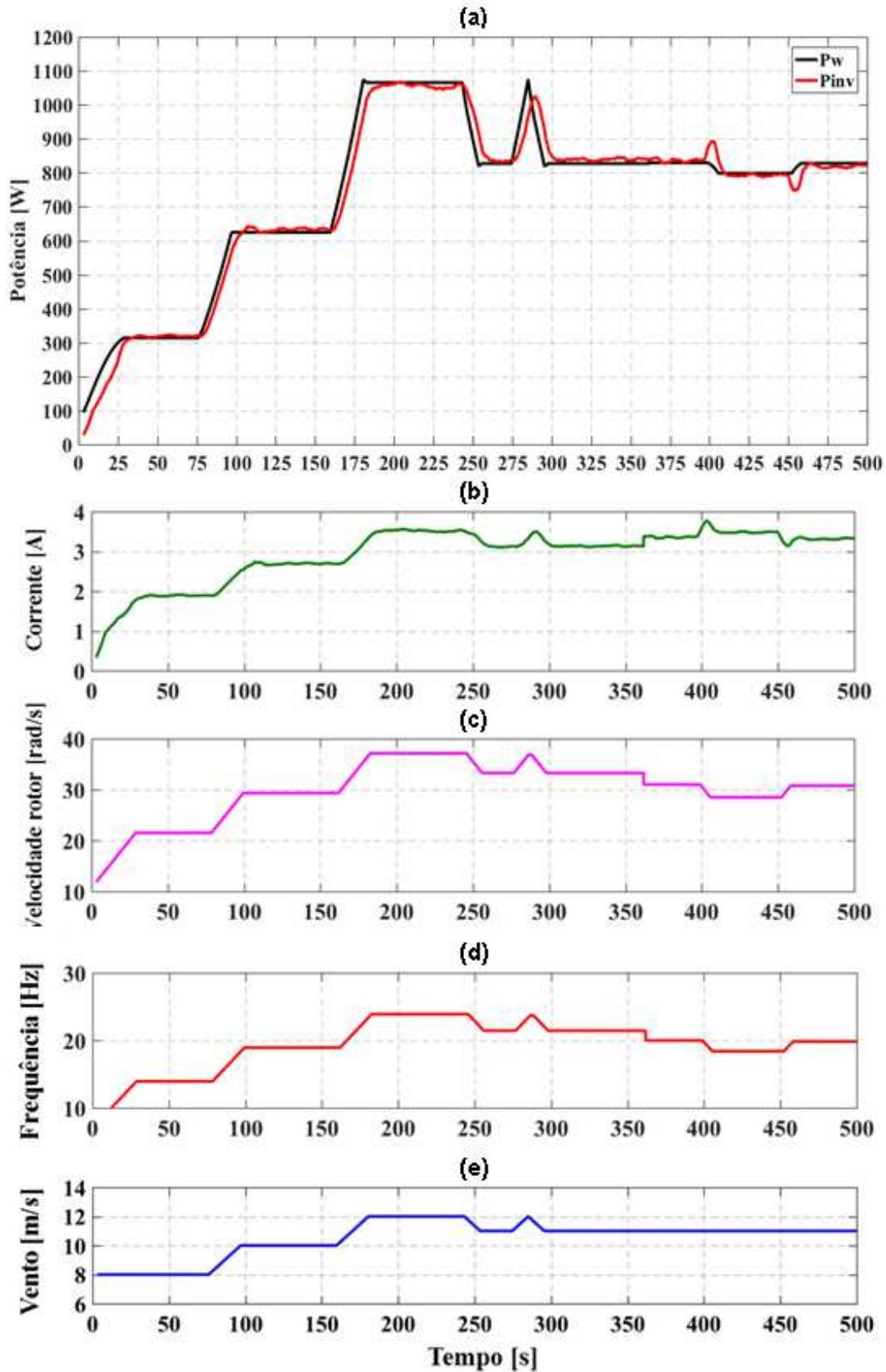
A Figura 31 mostra o resultado obtido após a emulação completa do Sistema Estático Desenvolvido. Na Figura 31 (a) apresenta-se as potências da turbina e do inversor, na Figura 31 (b) mostra-se a corrente do inversor, na Figura 31 (c) a velocidade do rotor, na Figura 31 (d) a frequência de operação do inversor e na Figura 31 (e) a velocidade do vento incidente. Inicialmente o vento incidente (V_w) foi ajustado para 8 m/s. Para esse cenário de emulação, desde o instante 0 s até o instante 400 s, a carga alimentada é de 28,25 Ω .

Assim que se inicia a operação do sistema, e se a velocidade de vento ajustada é superior ao limite inferior de 3 m/s, o inversor é habilitado. Até o instante 25 s, o sistema busca pela potência de referência P_w igual a 314 W, valor de referência para a carga (28,25 Ω) e o vento a 8 m/s. A partir do instante que o inversor consegue alcançar a frequência de operação, para esta potência, o sistema estabiliza em torno do primeiro ponto de operação e a frequência do inversor é de 13,95 Hz. Como pode-se observar, a potência entregue pelo inversor nesse momento varia entre 315 W e 322 W, com erro máximo de 2,5%. O sistema permanece nesse ponto de operação enquanto não há perturbação externa.

No instante 75 s, ocorre uma perturbação externa, representada pelo aumento da velocidade do vento, ou seja, uma variação de 8 para 10 m/s. O sistema novamente passa a buscar um novo ponto de equilíbrio, que agora ocorre na frequência de 18,95 Hz. Enquanto a velocidade do vento está em uma rampa crescente, a potência esperada da turbina aumenta e a potência entregue pelo inversor acompanha essa solicitação. O aumento da velocidade do vento implica em um acréscimo de velocidade no rotor, que aumenta a frequência de operação e a corrente entregue à carga. No instante 100 s o vento cessa sua variação e o sistema passa a não perceber mais uma perturbação e mantém constante a potência fornecida. A potência obtida nesse ponto de operação se manteve na faixa de 624 W à 633 W ao invés de 624 W como esperado, sendo um erro máximo de 1,4%.

O sistema permanece em equilíbrio até que uma nova perturbação ocorra no instante 160 s. De forma análoga, o sistema detecta a variação positiva de vento, fato que gera um aumento da potência de referência e, em consequência, um aumento da potência entregue pelo inversor à carga.

Figura 31 – Curvas obtidas em uma emulação completa: (a) potência, (b) corrente, (c) velocidade do rotor, (d) frequência e (e) vento.



Fonte: produção do próprio autor (2017).

O vento se estabiliza, mantendo-se constante no valor de 12 m/s, e com uma frequência de operação de 23,9 Hz. Para uma potência esperada de 1066 W o Sistema Estático Desenvolvido apresentou resultados na faixa entre 1055 e 1068 W.

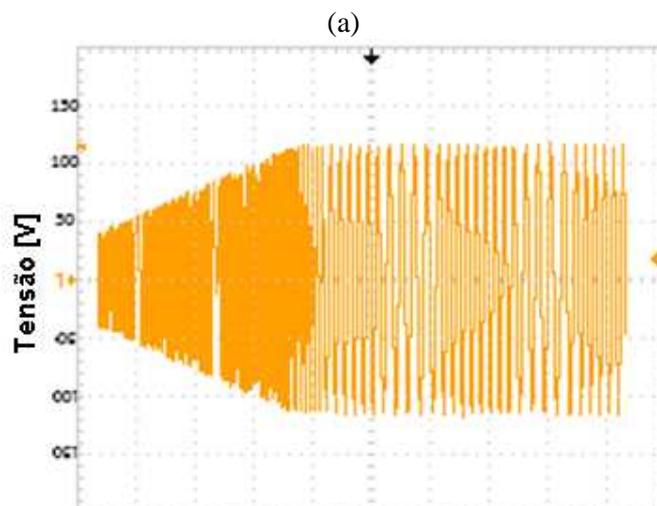
Após essa etapa, o sistema identifica uma variação decrescente do vento, o qual reduz sua velocidade de 12 para 11 m/s. A partir desse instante, a potência de referência diminui promove uma redução na frequência de operação do inversor, a qual varia de 23,9 Hz para 21,45 Hz. A potência, nessa condição, fica igual a 827 W e o sistema atingiu valores entre 833 a 839 W, com erro de 1,5%.

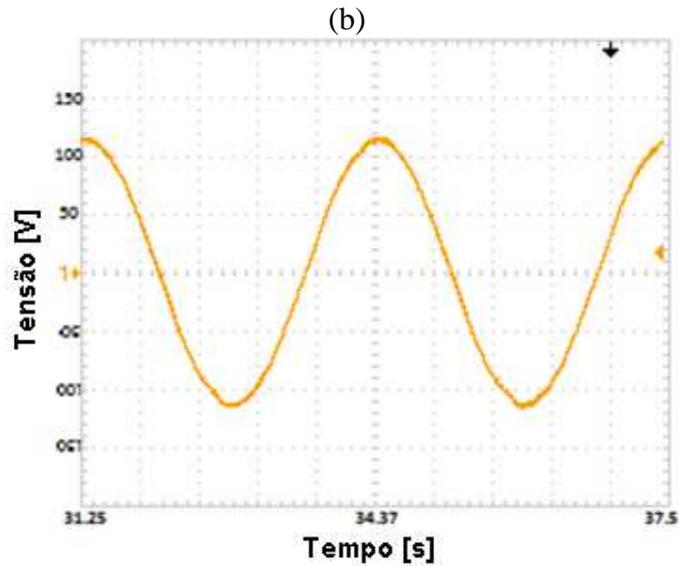
Uma variação brusca no vento ocorre no intervalo entre 275 a 295s, onde há um aumento da velocidade seguida de uma redução. Assim que o sistema identifica a variação ele varia a potência fornecida.

No instante 400 s, ocorre uma variação na carga, e o sistema passa a alimentar uma carga resistiva de 24,22 Ω , para um vento constante de 11 m/s. Percebe-se que no momento em que a carga aumenta a corrente se eleva de forma acentuada. Isso resulta, inicialmente, no aumento da potência fornecida pelo inversor, gerando um atraso de resposta. Entretanto, logo em seguida, a operação se adapta a um novo ponto de equilíbrio. Nesse caso, o sistema passa a operar com 18,4 Hz e potência próxima a 798 W.

A Figura 32 mostra as formas de onda da tensão na saída do filtro para um vento de 10m/s.

Figura 32 – Tensão obtida na saída do filtro para velocidade do vento igual a 10 m/s



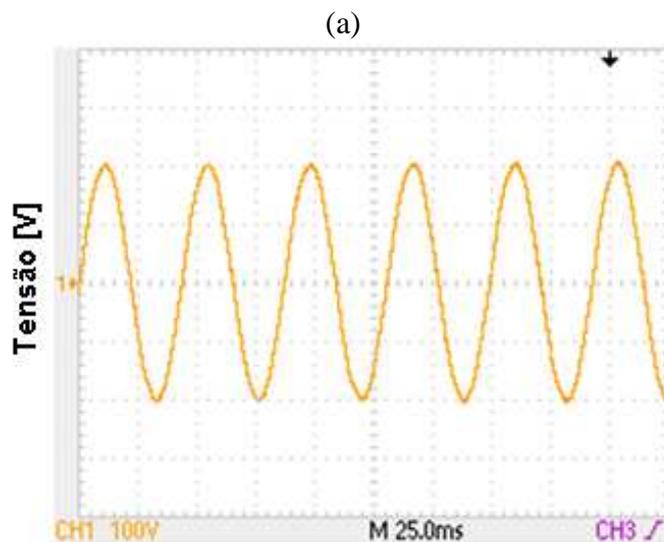


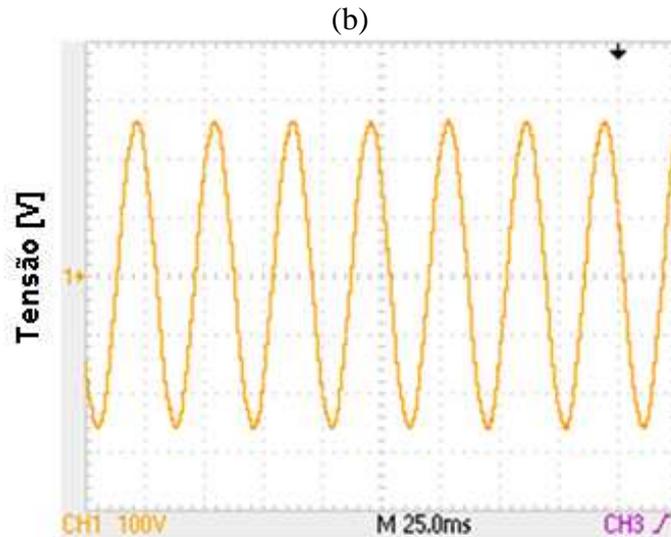
Fonte: produção do próprio autor (2017).

Como é possível observar na Figura 32 (a), o aumento da amplitude ilustra a variação desde o ponto em que o inversor está desabilitado até o ponto em que o sistema entra em regime. Na Figura (b), mostra-se um detalhe a forma de onda senoidal.

A Figura 33 mostra um detalhe da forma de onda da tensão fornecida pelo inversor à carga, para dois diferentes cenários de emulação. Na Figura 33 (a), apresenta-se o resultado obtido para emulação com vento de 8m/s, na Figura 33 (b) para o vento de 10m/s.

Figura 33 – Forma de onda da tensão para ventos de: (a) 8 m/s e (b) 10m/s.





Fonte: produção do próprio autor (2017).

Em ambas as emulações, a carga trifásica resistiva empregada foi de $28,25 \Omega$. Ao comparar os dois resultados, verifica-se que na Figura 33 (a), foi obtida uma onda mais alargada horizontalmente, ou seja, com frequência menor, ou seja, igual a $13,95 \text{ Hz}$ e com amplitude máxima de aproximadamente 100 V . Na Figura 33 (b), percebe-se uma onda mais comprimida horizontalmente, com frequência de operação maior, ou seja, $18,95 \text{ Hz}$, e com valor de pico, aproximadamente, de 135 V . Em ambos os casos, obteve-se uma forma de onda senoidal com a qualidade esperada.

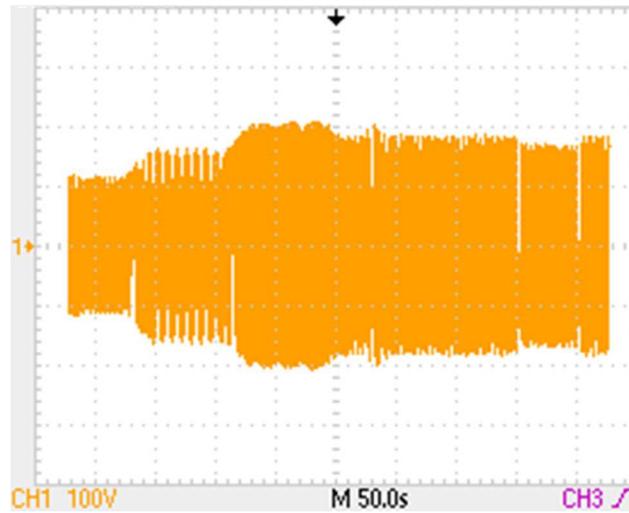
A Figura 34 mostra a forma de onda ao longo de toda a emulação correspondente ao cenário utilizado quando da obtenção da na Figura 30. Para que toda a emulação fosse contemplada, o período de amostragem foi ajustado, e assim, não se torna mais possível identificar, de forma detalhada, o formato senoidal da tensão.

Portanto, o objetivo da Figura 34 é apresentar o espectro da tensão ao longo das diversas perturbações externas que a emulação recebeu. Primeiramente, é percebido que conforme o vento sofre variação crescente de 8 para 10 m/s e de 10 para 12 m/s , a amplitude da onda de tensão aumenta de 105 V para 130 V e em seguida atinge 203 V .

Observa-se também a diminuição da amplitude da onda de tensão quando o vento varia de 12 para 11 m/s . E em seguida, verifica-se a variação quando o vento oscila bruscamente de 11 para 12 m/s e retorna para 11 m/s . No trecho mais à direita do espectro, percebe-se o momento em

que ocorre uma variação da carga. Pode-se verificar uma depressão na amplitude da onda exatamente no momento em que a carga varia de $28,25 \Omega$ para $24,22 \Omega$, e se mantém neste último valor.

Figura 34 – Frequência e forma de onda da tensão para ventos de 8 m/s e 10m/s



Fonte: produção do próprio autor (2017).

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

Para propiciar novas plataformas de estudos, e reduzindo os custos com compra de equipamentos e montagens que desprendem uso de grandes espaços, a emulação com o emprego de inversor tem ganhado força nas linhas de pesquisa e no desenvolvimento de novas técnicas para soluções mais práticas de geração eólica distribuída.

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento e a implementação de um sistema estático que pudesse emular um sistema composto por turbina gerador contrapondo as estruturas para ensaios já existentes, as quais empregam um conjunto motor-gerador. Além disso, se disponibilizaria um sistema de baixo custo para viabilizar estudos futuros sobre geração eólica.

No Capítulo 2 foi introduzido o conceito da geração de energia através dos ventos, evidenciando as principais equações matemáticas que modelam o comportamento de um aerogerador e os tipos de turbinas existentes. Na sequência, foi feita uma descrição sobre o uso de geradores síncronos para geração de energia eólica, bem como as vantagens e as desvantagens em relação aos demais modelos de geradores.

O Capítulo 3 foi dedicado a descrever princípio de funcionamento do Sistema Estático correlacionando como o comportamento dos equipamentos utilizados pode suprir o uso de motores e geradores na emulação. Tendo como base o estudo descrito no Capítulo 3, foi possível realizar a parametrização do sistema implementando de forma bastante adequada, como apresentado no Capítulo 4. Os resultados obtidos da parametrização do inversor empregada se mantiveram dentro da margem de operação desejada, respeitando o limite de erro adotado de 5%. Tanto a escolha dos equipamentos como a parametrização do inversor foram determinantes para a operação do sistema dentro dos níveis de frequência desejáveis de 7,5 a 30Hz.

Cabe destacar, que são os parâmetros do inversor que propiciam os ajustes nos níveis desejados de tensão para o controle V/F ajustável. Tal controle permitiu que a tensão, do sistema implementado, fosse variada dentro de um espectro, inclusive, fora do padrão dos controles existentes.

Através da emulação do sistema implementado foram obtidos os resultados descritos no Capítulo 4. Quando o vento incidente nas pás foi de 8m/s, foi obtida uma potência esperada de 314 W para uma carga de 28,25 Ω . A partir da emulação os valores de potência obtidos ficaram entre 315 e 322 W. Ao variar tanto as características do vento incidente como da carga, outros resultados, muito próximos dos valores esperados, foram adquiridos pela emulação do sistema. Quando o vento incidente atinge 12 m/s, correspondente à velocidade nominal da turbina, a potência obtida variou entre 1055 a 1068 W, valores muito próximos ao esperado que é de 1066 W.

As frequências de operação variaram dentro da faixa pré-definida. Tal faixa foi configurada através dos parâmetros do inversor. A configuração foi realizada com base no programa embarcado na plataforma Arduino Due. Desta forma, quando as velocidades de vento atingiram valores inferiores a 3 m/s ou superiores a 25 m/s, o inversor é desabilitado, e permanece em estado de espera, até que os níveis de vento estejam dentro da faixa estipulada.

Diferentes emulações foram realizadas, considerando diferentes possíveis cenários, tais como: primeiro, foi mantido constante tanto o valor do vento incidente como o valor da carga. Outra condição utilizada foi: variou-se o valor do vento incidente, mas foi mantido a carga com valor constante. Uma outra condição foi: manteve-se constante a velocidade do vento incidente e o valor da carga foi variado. E por último, utilizou-se a condição de variar tanto o vento incidente como o valor da carga. Os resultados obtidos se mostraram muito próximos dos valores teóricos esperados, inclusive dentro da margem de erro estabelecida de 5%. Desta forma, pode afirmar que o sistema estático de emulação de turbinas eólicas foi validado, e portanto, poderá ser utilizado para estudos e avaliações de diversos perfis de ventos incidentes bem como de diversos tipos de variações de carga. Cabe destacar que deve ser observado os limites operacionais tanto do inversor como da plataforma Arduino Due empregados.

O sistema estático de emulação foi implementado no laboratório LEPAC da UFES. Ele utiliza um conjunto com poucos equipamentos de volume reduzido, o que resulta na ocupação de um pequeno espaço físico. O emprego da plataforma *IDE* do Arduino Due, além da flexibilidade, disponibilizou uma interface amigável tornando simples e muito prática a sua utilização. Este texto foi deslocado para o próximo parágrafo.

A partir da comprovação da funcionalidade do sistema estático de emulação, pode-se concluir que é possível empregar um inversor comercial para emular o comportamento de uma turbina de geração eólica utilizado um GSIP. Para tanto, deve-se realizar tanto os ajustes dos parâmetros do inversor, como obter, de forma adequada, variáveis envolvidas no controle. Inclusive, a plataforma Arduino Due pode realizar de forma bastante adequada, as tarefas de controle do sistema estático de emulação nas aplicações de energia eólica.

Em continuidade a esse trabalho sugere-se o estudo e a modelagem quando se insere o amortecimento mecânico introduzido pelas constantes J e B das turbinas eólicas. Isso tornará à emulação com sistema estático mais precisa. Cabe destacar que todas as turbinas possuem partes mecânicas além da sua inércia que afetam o desempenho do conjunto aerogerador.

Sugere-se ainda, a implementação da comunicação serial entre a plataforma Arduino Due e o inversor em substituição da comunicação analógica utilizada, do tipo Pull-Up, devido a facilidade da implementação. Tal substituição resultaria na eliminação de circuitos externos utilizados tanto para adequação dos níveis de tensão entre os dois dispositivos, bem como para filtragem de ruídos. Inclusive, neste trabalho, foi necessário a implementação de um filtro digital para a eliminação dos ruídos provenientes das leituras das variáveis do inversor.

Por fim, propõe-se avaliar o uso de um sistema similar para emular geradores de indução tipo gaiola de esquilo, já que a modelagem da turbina é do mesmo tipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, A. E. A. **“Suportabilidade e Fundamentos de Tensão no DFIG Utilizando Conversor Modular Multinível Híbrido”**. Texto de Qualificação de Doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

ANEEL. **“Resolução Normativa Nº 482”**, de 17 de Abril de 2012.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **“Matriz de Energia Elétrica do Brasil”**, 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacid>. Acesso em: 5 de Junho de 2017.

ARDUINO, Disponível em: www.arduino.cc, visitado em 07 de Agosto de 2017.

CUSTODIO, R. S., **“Energia Eólica Para produção de Energia Elétrica”**, Rio de Janeiro, Eletrobrás, 2009, 280p.

SILVA, J. C. M. da, **“Geradores Elétricos para Aproveitamentos de Energias Renováveis”**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2008.

DIAS, M. V. X., BOROTNI, E. C., HADDAD, J., **“Geração Distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras”**, Revista Brasileira de Energia, Vol. 11, No. 2. 2005.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, **“Balanço Energético Nacional 2017”**, 2017. Meio eletrônico.

FERREIRA, A. A. de A. **“Sistema de Produção de Energia Eólica. Dissertação”**, Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Porto, 2011.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; KUSKO, A. **“Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas”**, São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

GASPAR, J. F. P., **“Gerador Síncrono de Imanes Permanentes para Microgeração Eólica Dimensionamento, Construção e Ensaio”**, Dissertação de Mestrado, Covilhã, out. 2013.

HATZIARGYRIOU, N.; JENKINS, N.; STRBAC, G.; LOPES, J. A. P.; RUELA, J.; ENGLER, A.; OYARZABAL, J.; KARINIOTAKIS, G.; AMORIM, A. **“Microgrids - Large Scale Integration of Microgeneration to Low Voltage Grids”**, In: International Council on Large Electric Systems – CIGRE 2006. Paris, France: [s.n.], 2006.

INEE, Instituto Nacional de Eficiência Energética, **“Notas Sobre Geração Distribuída – Introdução.”** Fórum de Cogeração, Julho 2001.

OLIVEIRA, F. D. C, **“Suportabilidade a Afundamentos de Tensão em Geradores DFIG Empregando Limitador Supercondutor”**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

PINTO, M. de O. **“Fundamentos de Energia Eólica”**, 1ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

RESE, L. **“Modelagem, análise de estabilidade e controle de microrredes de energia elétrica”**, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SEGUNDO, A. K. R., RODRIGUES, C. L. C, **“Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos”**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia”, IFES, Campus Ouro Preto, Minas Gerais, 2015.

SLOOTWEG, J. G., H. Polinder and W. L. Kling. **“Representing wind turbine electrical generating systems in fundamental frequency simulations.”**, IEEE Trans. on energy conversion 18.4 (2003): 516-524.

T. F. CHAN e L.L LAI, **“Permanent-magnet machines for distributed generation: A review”**, 2007. IEEE Power Engineering Annual Meeting, pp. 1–6. Meio eletrônico.

VILLALVA, M.G., GAZOLI, J.R. **“Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações: Sistemas Isolados e Conectados à Rede”**, 1ª ed. Editora Érica. 2012.

WEC – Word Energy Council, **“Word Energy Resources 2016”**, Out. 2016. Meio Eletrônico.

WEG, **“Manual do Inversor de Frequência CFW09”** Versão 3.7X, 2006.

WENZEL, G. M., **“Projeto Aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal”**, Monografia, PUCRS, Porto Alegre, Nov. 2007.

YANG Y. M, L., WANG J., WANG F., TOLBERT L. M. **“Full-converter wind turbine emulator in converter based power grid emulation system”**. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013.

ZHONG Q., WEISS G., **“Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators”**, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 58.4, pp.1259–1267, Apr. 2011.

APÊNDICE A

```
//TRABALHO DE MESTRADO
//ALUNA: RACHEL CAMPAGNARO CARMINATI
//ORIENTADOR: DR. PROF. DOMINGOS SIMONETTI / JOSÉ LUIZ F. VIEIRA
//TEMA: EMULADOR DE TURBINA DE GERAÇÃO EÓLICA COM GSIP
EMPREGANDO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

//DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS
float A; //area
float pi; //3,1315
float R; //raio
float lambda;
float wt; //velocidade angular
float wt1; //velocidade angular ajustada para faixa de valores de 0 a 1023
float Vw; //vento em m/s
float lambdaI;
float Beta; // beta
float Cp;
float c1; float c2; float c3; float c4; float c5;
float c6; float c7; float c8; float c9;
float Ro;
float P; //potencia
float corrlida = 0; // frequencia lida pelo arduino (porta A0)
float potcalc;
float I;
float V;
float freq;
int vento;
float corrlidaant = 0;
float Imed[30];
float Imed1;
float Imed2;
```

```
int tamanho;
float Imedant;
int k;
float soma;
float time1;

#define D1 50

void setup() {
  Serial.begin(9600); //Enviar e receber dados em 9600 baud

  //ajuste do tamanho da faixa de operação e set do pino de saida digital
  analogWriteResolution(10); // 0 a 1023
  pinMode (D1, OUTPUT); // seta a saida D11 como saida (porta de sinal digital para o
  GIRA/PARA

  //SET DAS VARIÁVEIS
  A = 0;
  R = 1.40;
  pi = 3.14159265358979;
  lambda = 0;
  wt = 11.78;
  wt1 = 65;
  Vw = 08.00;
  Beta = 0;
  Ro = 1.1225;
  Cp = 0;
  potcalc = 0;
  corrlida = 0;
  corrlidaant = 80;
  I = 0.82;
  Imed1 = 50;
  Imed2 = 50;
```

```

V = 48;
freq = 7.75;
Imedant = 0;
tamanho = 30;
for (k = 0; k < tamanho; k++)
{
    Imed[k] = 25;
}
vento = 0;

//Constantes de Sloodweg
c1 = 0.73;
c2 = 151;
c3 = 0.58;
c4 = 0.002;
c5 = 2.14;
c6 = 13, 2;
c7 = 18.4;
c8 = -0.02;
c9 = -0.003;

Serial.println("Calculo de area, lambda, cp, potencia e torque:");
delay(3000);

//Calculo da área
A = pi * pow(R, 2);
}

void loop() {

//Função GIRA/PARA - LOW = PARA / HIGH = GIRA
//Para vento <3m/s (freq=15Hz) e >25m/s
if (wt1 < 30 || wt1 > 1023)

```

```

{
digitalWrite(D1, HIGH); //desligar o inversor
Serial.print("Limite maximo atingido: freq = ");
Serial.println(wt1);
wt1 = 0;
wt = 0;
}
else
{
delay(50);
digitalWrite(D1, LOW); //ligar o inversor
analogWrite(DAC0, wt1);
Serial.print(" wt1 = ");
Serial.print(wt1);
//delay(100);

//EQUAÇÕES DA TURBINA EÓLICA (GERADOR H31)
//Calculo do lambda
lambda = (wt * R) / (Vw);
lambda = lambda;

//Calculo do lambdai
lambdai = 1.77 / (1 / ((lambda + (c8 * Beta))) - (c9 / (pow(Beta, 3) + 1)));
lambdai = lambdai;

//Calculo do Cp
Cp = c1 * ( (c2 / (lambdai)) - (c3 * Beta) - (c4 * Beta) - c6) * (exp(-c7 / lambdai));
Cp = Cp;

//Calculo da Potencia
P = ((Ro * (Cp * A * pow(Vw, 3))) / 2) / 2.50; //potencia calculada pela equação slootweg
Serial.print(" P = ");
Serial.print(P);

```

```
//Ler corrente atual
corrlida = analogRead(A0);
Serial.print(" Corrlida: ");
Serial.print(corrlida);

if (corrlida < 0.85 * corrlidaant || corrlida > 1.15 * corrlidaant)
{
    corrlida = corrlidaant;
}
else
{
    corrlida = corrlida;
}
for (k = 1; k <= tamanho; k++)
{
    Imed[k - 1] = Imed[k];
}
Imed[tamanho - 1] = corrlida;
soma = 0;
for (k = 0; k < tamanho; k++)
{
    soma = soma + Imed[k];
}
Imed1 = soma / tamanho;
Imed2 = Imed1 * 0.83;
corrlidaant = corrlida;
Serial.print(" corrlidaajus: ");
Serial.print(corrlida);
Serial.print(" Imed1: ");
Serial.print(Imed1);
Serial.print(" Imed2: ");
Serial.print(Imed2);
```

```
potcalc = sqrt(3) * I * V;
Serial.print(" Potcalc: ");
Serial.print(potcalc);
}
Serial.println();

if (potcalc < P * 0.95)
{
  wt1 = wt1 + 2.10;
  wt = wt + 0.07854;
  freq = freq + 0.05;
  Serial.print(" wt: ");
  Serial.print(wt);
  Serial.print(" Freq: ");
  Serial.print(freq);

  if (wt1 < 365)
  {
    V = V + 0.399;
    I = (Imed2 / 280.40) * 4.20;
    Serial.print(" I: ");
    Serial.print(I);
    Serial.print(" V: ");
    Serial.print(V);
  }
  else
  {
    V = V + 0.379;
    I = (Imed2 / 280.40) * 4.20;
    Serial.print(" I: ");
    Serial.print(I);
    Serial.print(" V: ");
```

```
    Serial.print(V);
  }
}
else if (potcalc >= P * 0.95 && potcalc <= P * 1.05)
{
  wt1 = wt1;
  wt = wt;
  freq = freq;
  Serial.print(" wt: ");
  Serial.print(wt);
  Serial.print(" Freq: ");
  Serial.print(freq);

  if (wt1 < 365)
  {
    V = V;
    I = (Imed2 / 280.40) * 4.20;
    Serial.print(" I: ");
    Serial.print(I);
    Serial.print(" V: ");
    Serial.print(V);
  }
  else
  {
    V = V;
    I = (Imed2 / 280.40) * 4.20;
    Serial.print(" I: ");
    Serial.print(I);
    Serial.print(" V: ");
    Serial.print(V);
  }
}
else
```

```
{  
    wt1 = wt1 - 2.10;  
    wt = wt - 0.07854;  
    freq = freq - 0.05;  
    Serial.print(" wt: ");  
    Serial.print(wt);  
    Serial.print(" Freq: ");  
    Serial.print(freq);  
  
    if (wt1 < 365)  
    {  
        V = V - 0.399;  
        I = (Imed2 / 280.40) * 4.20;  
        Serial.print(" I: ");  
        Serial.print(I);  
        Serial.print(" V: ");  
        Serial.print(V);  
    }  
    else  
    {  
        V = V - 0.379;  
        I = (Imed2 / 280.40) * 4.20;  
        Serial.print(" I: ");  
        Serial.print(I);  
        Serial.print(" V: ");  
        Serial.print(V);  
    }  
  
    //PERFIL DO VENTO  
    }  
    vento++;  
    if (vento <= 350)  
    {
```

```
Vw = 8.00;
}
else if (vento > 350 && vento <= 450)
{
    Vw = Vw + 0.02;
}
else if (vento > 450 && vento <= 750)
{
    Vw = Vw;
}
else if (vento > 750 && vento <= 850)
{
    Vw = Vw + 0.02;
}
else if (vento > 850 && vento <= 1150)
{
    Vw = Vw;
}
else if (vento > 1150 && vento <= 1200)
{
    Vw = Vw - 0.02;
}
else if (vento > 1200 && vento <= 1300)
{
    Vw = Vw;
}
else if (vento > 1300 && vento <= 1350)
{
    Vw = Vw + 0.02;
}
else if (vento > 1300 && vento <= 1400)
{
    Vw = Vw - 0.02;
```

```
}  
else  
{  
  Vw = Vw;;  
}  
Serial.print(" Vento: ");  
Serial.print(vento);  
Serial.print(" Vw: ");  
Serial.print(Vw);  
Serial.print(" Time: ");  
time1 = millis();  
Serial.print(time1);  
}
```