

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THIAGO PAULA SILVA DE AZEVEDO

BANCADA EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS EM GERADORES ELÉTRICOS
UTILIZADOS EM AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

DM 09/2012

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THIAGO PAULA SILVA DE AZEVEDO

BANCADA EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS EM GERADORES ELÉTRICOS
UTILIZADOS EM AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THIAGO PAULA SILVA DE AZEVEDO

BANCADA EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS EM GERADORES ELÉTRICOS
UTILIZADOS EM AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

DM 09/2012

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2012

A994b Azevedo, Thiago Paula Silva de

Bancada experimental para ensaios em geradores elétricos utilizados em aerogeradores de pequeno porte / Thiago Paula Silva de Azevedo; orientador, João Tavares Pinho. - 2012.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2012.

1. Energia Eólica. 2. Turbinas Eólicas - testes. I. Orientador. II. Título.

CDD 22. ed. 621.312136

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BANCADA EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS EM GERADORES ELÉTRICOS
UTILIZADOS EM AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

AUTOR: THIAGO PAULA SILVA DE AZEVEDO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM 26 / 04 / 2012

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr.-Ing. João Tavares Pinho
(ORIENTADOR - UFPA)

Prof. Dr. Marcos André Barros Galhardo
(CO-ORIENTADOR - UFPA)

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(MEMBRO - UFPA)

Prof. Dr. Tadeu da Mata Medeiros Branco
(MEMBRO - UFPA)

Prof. Dr. Jerson Rogério Pinheiro Vaz
(MEMBRO - UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(COORDENADOR DO PPGE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pelo dom da vida e pelas forças concedidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A meus pais, Francisco Sales e Maria das Graças Paula, por todos os sacrifícios feitos em prol do meu desenvolvimento e por todas as oportunidades que me proporcionaram.

A Karina Barroso, pelo amor e paciência que me foram concedidos ao longo dos anos.

Ao professor João Tavares Pinho (orientador), pelo tempo dispensado e conselhos dados.

Aos professores e amigos Luis Blasques, Marcos Galhardo e Tadeu Branco, pelos conselhos e incentivos proporcionados.

A todos os amigos do GEDAE, pelo apoio manifestado para o desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES e GEDAE/INCT-EREEA, pelo suporte financeiro, e ao CNPq pelos equipamentos adquiridos por meio dos projetos intitulados “Desenvolvimento de Aerogerador de 1 kW com Rotor Adequado para Condições de Vento da Região Amazônica” e “Bancada para Testes de Desempenho de Geradores Elétricos, Utilizados em Aerogeradores de Pequeno Porte, sob Condições Simuladas de Vento” aprovados nos editais MCT/CNPq/CTEnerg nº28/2006 e MCT/CNPq 15/2007, respectivamente.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	iv
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	1
ABSTRACT	2
INTRODUÇÃO	3
CAPÍTULO 1 - AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE	6
1.1. Características e tecnologias de geradores de pequeno porte.....	6
1.1.1. Gerador síncrono com fluxo radial.....	10
1.1.2. Gerador com fluxo axial e excitação através de ímãs permanentes.....	11
1.1.3. Gerador com fluxo transversal e excitação através de ímãs permanentes..	14
1.2. Outras partes constituintes de aerogeradores de pequeno porte.....	16
1.2.1. Rotor.....	16
1.2.2. Leme.....	17
1.2.3. Torre.....	17
1.3. Aerogerador desenvolvido no grupo de pesquisa GEDAE.....	18
1.4. Utilização de aerogeradores de pequeno porte na Região Amazônica.....	19
1.5. Considerações finais.....	21
CAPÍTULO 2 - DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DA BANCADA DE TESTES PARA AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE	24
2.1. Descrição da bancada experimental.....	24
2.2. Descrição do sistema de aquisição de dados.....	28
2.2.1. Placa de aquisição de dados.....	29
2.3. Descrição do sistema de controle.....	34
2.4. Programação desenvolvida para controle e aquisição de dados.....	37
CAPÍTULO 3 - REALIZAÇÃO DE TESTES PARA VALIDAÇÃO DA BANCADA	52
3.1. Procedimentos experimentais para ensaio em geradores elétricos.....	52
3.2. Resultados de ensaios realizados em geradores de fluxo axial.....	56

CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
TRABALHO PUBLICADO.....	71

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Ilustração das forças atuantes em um perfil aerodinâmico em função da incidência do vento (adaptado de Manwell, 2009).....	7
Figura 1.2 - Gerador com fluxo radial excitado através de ímãs permanentes: a) com ímãs instalados na superfície e enrolamento monofásico b) com ímãs instalados na superfície e enrolamento trifásico; c) com concentração de fluxo e enrolamento monofásico; d) seção transversal dessa concepção. (BRANCO, 2010).....	11
Figura 1.3 - Gerador com fluxo axial excitado através de ímãs permanentes a) Estrutura em uma única peça, com um estator e dois discos de rotor; b) Seção transversal destacada. (BRANCO, 2010).....	12
Figura 1.4 - Seção transversal de um gerador com estator toroidal e fluxo axial: vista transversal de uma máquina Torus. (BRANCO, 2010).....	13
Figura 1.5 - Projeção parcial da máquina Torus segundo uma direção circunferencial, no sentido radial para o seu interior. (SPOONER e CHALMERS, 1992 e BUMBY <i>et al</i> , 2004).....	14
Figura 1.6 - Gerador com fluxo transversal excitado por ímãs permanentes. Configuração de entreferro axial a considerar: a) bobinas do estator externas direcionando os passos de fluxo; b) bobinas do estator internas direcionando os passos de fluxo (adaptado de AKHMATOV et al. 2003).....	15
Figura 1.7 - Máquina síncrona de ímãs permanentes utilizadas em aerogerador. (MELO, 2009).....	15
Figura 1.8 - Componentes de um aerogerador de pequeno porte. (MELO, 2009).....	16
Figura 1.9 - Protótipo do gerador desenvolvido.....	18
Figura 1.10 - Protótipo do gerador desenvolvido com detalhe do encaixe das pás.....	19
Figura 2.1 – Esboço dos componentes da bancada de testes.....	24
Figura 2.2 – Imagem do sistema de teste em bancada.....	25
Figura 2.3 - Esboço e dimensões das partes integrantes da estrutura de suporte que sustenta o gerador a ser ensaiado. (BRANCO, 2010).....	26
Figura 2.4 - Esboço das partes integrantes da estrutura de suporte, relacionadas à base do conjunto, e à sustentação do motor de indução trifásico. (BRANCO, 2010)....	26

Figura 2.5 - Esboço e dimensões do terminal aplicado na parte externa do disco metálico anterior do rotor elétrico do gerador para o acoplamento com o motor nos ensaios de laboratório. (BRANCO, 2010).....	27
Figura 2.6 - Estrutura de sustentação construída para ensaios no gerador.....	27
Figura 2.7 - Representação esquemática do sistema de medição.....	28
Figura 2.8 - Placa de aquisição de dados utilizada.....	29
Figura 2.9 - Transdutor de tensão LV 25-P da LEM (LEM, 2011).....	30
Figura 2.10 - Circuito do transdutor de tensão LV 25-P: +HT : polo positivo; -HT : polo negativo; terminal + : entrada de tensão entre +12 e +15 V; terminal M: medição; terminal - : entrada de tensão entre -12 e -15 V. (LEM, 2011).....	31
Figura 2.11 - Transdutor de corrente HAL 50-S da LEM (LEM, 2011).....	31
Figura 2.12 - Circuito do transdutor de corrente HAL 50-S: terminal 1: entrada de tensão em + 15V; terminal 2: entrada de tensão em - 15 V; terminal 3: saída; terminal 4: (LEM, 2011).....	31
Figura 2.13 - Gráfico da relação entrada-saída para o transdutor de tensão.....	32
Figura 2.14 - Gráfico da relação entrada-saída para o transdutor de corrente.....	32
Figura 2.15 - Sensor magnético tipo pick-up utilizado para medir a velocidade angular (DLG, 2012).....	33
Figura 2.16 – a) Parâmetros para confecção da roda dentada utilizada na medição; b) Parte do sensor a partir da qual são especificados os parâmetros “A”, “C”, “E” e “H” (DLG, 2012).....	33
Figura 2.17 - a) Roda dentada confeccionada, com a indicação dos valores dos parâmetros “A”, “C” e “H”; b) Distância “E”; c) Tamanho “D”.....	34
Figura 2.18 - Esquema simplificado de um inversor monofásico (CAPELLI, 2002).....	35
Figura 2.19 - Esquema simplificado de um inversor trifásico (CAPELLI, 2002).....	35
Figura 2.20 - Diagrama de blocos simplificado de um inversor de frequência (CAPELLI, 2002).....	36
Figura 2.21 - Diagrama de blocos de uma rede de inversores conectados a um dispositivo de controle (mestre) (WEG, 2006).....	37
Figura 2.22 - Representação da estrutura de dados utilizados na comunicação do inversor (WEG, 2006).....	38
Figura 2.23 - Estrutura de codificação das mensagens, para uma solicitação de leitura em uma variável, trocadas entre microcomputador e inversor (WEG, 2006).....	40

Figura 2.24 - Descrição do campo “código” nos telegramas de leitura e escrita (WEG, 2006).....	40
Figura 2.25 - Tela principal do programa.....	42
Figura 2.26 - Tela principal do programa de aquisição de dados e controle do inversor....	42
Figura 2.27 - Janela exibindo as formas de onda das tensões nas fases de uma máquina ensaiada.....	43
Figura 2.28 - Janela exibindo a forma de onda da corrente em uma das fases de uma máquina ensaiada.....	44
Figura 2.29 – Ilustração do acoplamento rotor-gerador.....	44
Figura 3.1 - Estrutura de sustentação do motor, onde é possível realizar o ajuste da altura para o acoplamento entre o motor e o gerador.....	53
Figura 3.2 - Peça de sustentação do gerador com parafusos para deslocamento vertical...	53
Figura 3.3 - Configuração da carga utilizada nos ensaios, com os valores das resistências dos ramos.....	54
Figura 3.4 - Tela do programa de controle.....	55
Figura 3.5 - Arquivo texto contendo os dados registrado de potência ativa e velocidade de vento.....	56
Figura 3.6 - Tensões geradas nas fases do equipamento sob teste.....	57
Figura 3.7 - Correntes de linha do gerador desenvolvido.....	57
Figura 3.8 - Tensões geradas nas fases de um gerador comercial de 1 kW.....	58
Figura 3.9 - Correntes de linha de um gerador de 1 kW.....	58
Figura 3.10 - Curva de potência do gerador com o rotor projetado por Vaz, (2010).....	59
Figura 3.11 - Curva de potência versus rotação para um gerador elétrico, simulado com um rotor projetado por Vaz, (2010).....	60
Figura 3.12 - Curva de potência do gerador comercial de 1 kW com rotor comercial....	51
Figura 3.13 – Curva de potência do gerador desenvolvido com rotor comercial.....	62
Figura 3.14 – Curva de potência obtida com gerador desenvolvido utilizando os parâmetros do rotor desenvolvido por Vaz (2010).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Codificação ASCII para utilização em protocolos de comunicação (WEG, 2006).....	39
Tabela 3.1 – Pontos que compõem a curva de potência do gerador comercial com rotor desenvolvido por Vaz (2010).....	61
Tabela 3.2 - Pontos que compõem a curva de potência do Gerador comercial com rotor comercial.....	61
Tabela 3.3 – Curva de potência do gerador desenvolvido com rotor comercial.....	62
Tabela 3.4 - Curva de potência do gerador desenvolvido com rotor desenvolvido por Vaz (2010).....	63

RESUMO

Este trabalho apresenta uma bancada para testes em geradores elétricos, utilizados em aerogeradores de pequeno porte. O sistema é composto basicamente por um motor de indução trifásico, que simula um rotor eólico, acoplado mecanicamente ao gerador elétrico submetido ao ensaio; um inversor de frequência, usado para variação da velocidade do motor; transdutores de grandezas elétricas, que efetuam a medição dos parâmetros de interesse (tensões e correntes instantâneas) na saída do gerador; um sensor de velocidade angular, para medição da rotação que é fornecida ao eixo do motor; um microcomputador, para monitoração e armazenamento dos parâmetros medidos, e controle do inversor de frequência, por meio de um programa computacional desenvolvido; e uma placa de aquisição de dados, que serve como interface entre os transdutores/sensores e o microcomputador.

A velocidade angular fornecida ao gerador em ensaio pode ser variada conforme valores fornecidos de velocidades de vento, as quais são associadas a valores correspondentes de rotação, a fim de simular o comportamento de um rotor eólico. Dessa forma, é possível traçar a curva de potência (potência versus velocidade de vento) do gerador ensaiado e analisar seu desempenho. Apresenta-se também neste trabalho os resultados de medições realizadas na bancada, referentes aos ensaios de um gerador comercial de pequena potência (1 kW) e de outro desenvolvido em projeto de pesquisa, ambos do tipo de ímã permanente com fluxo axial.

PALAVRAS-CHAVE: Bancada experimental, Aerogeradores de pequeno porte, Geradores elétricos, Ensaio elétrico; Gerador de ímã permanente.

ABSTRACT

This dissertation presents a test setup for electrical generators used in small wind turbines. The system is basically composed by an induction motor, which simulates a wind rotor, mechanically coupled to the electrical generator under test; a frequency inverter, used to change the motor speed; transducers of electrical parameters, for the measurement of the parameters of interest (instantaneous voltage and current) at the generator output; an angular velocity sensor for measuring the rotation of the motor shaft; a microcomputer, for monitoring and storing the measured parameters, and control the frequency inverter, through a software developed; a data acquisition board, which serves as the interface between the transducers/sensor and the microcomputer.

The angular speed supplied to the generator can be varied according to the given wind speeds values, which are associated with corresponding values of rotation, in order to simulate the behavior of a wind rotor. Thus, it is possible to trace the power curve (power versus wind speed) of the tested generator and analyze its performance. Also presented in this work are the results of measurements made, using the developed setup of a small commercial generator (1 kW) and other developed in a research project, both axial flux permanent magnet machines.

KEYWORDS: Measurement setup, Small wind turbines, Electric generators, Electrical tests, Permanent magnet generator.

INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia para a geração de eletricidade que substituam as fontes convencionais, baseadas em combustíveis fósseis, tem crescido ao longo dos anos em todo o planeta. Esse crescimento deve-se à preocupação com a escassez desses combustíveis no futuro e em função dos impactos ambientais nocivos decorrentes de seus usos. Dentre as alternativas às fontes convencionais, destaca-se a energia eólica.

Por ser pouco poluente, abundante, e causar perturbações mínimas ao meio ambiente, a energia eólica é uma alternativa promissora, tanto para o atendimento de grandes centros urbanos, com conexão direta à rede, quanto para suprir a demanda de pequenas comunidades isoladas, que encontram-se desprovidas da eletricidade fornecida pela rede elétrica convencional.

Entretanto, para que seja possível obter um aproveitamento ótimo do recurso eólico, é necessário que as máquinas (aerogeradores) estejam devidamente adequadas à utilização dentro das condições do local de instalação.

No Brasil, de modo particular, na Região Amazônica, as características de velocidades de vento diferem daquelas nas quais os aerogeradores convencionais são projetados para operar. As velocidades médias obtidas nessa região em geral são menores que 5 m/s a uma altura de 30 metros (FRADE, 2000), e a faixa de operação nominal das máquinas convencionais, em geral, situa-se em torno de 10 a 12 m/s.

Dessa forma, existe a necessidade de se conhecerem as características elétricas e o desempenho de um gerador (utilizado para geração eólica), para diferentes valores de velocidade de vento, a fim de se realizarem estudos comparativos, que indiquem qual máquina é a mais apropriada para determinada aplicação, além de auxiliarem no projeto e desenvolvimento de equipamentos mais eficientes.

Além disso, ensaios realizados em laboratório permitem determinar quais modelos são mais adequados às condições específicas de disponibilidade de recursos naturais. Por exemplo, em sistemas eólicos de geração de energia, os ensaios têm o objetivo de determinar a curva característica (potência elétrica gerada versus velocidade de vento) do equipamento, simulando o perfil de velocidades de vento através do uso de motores de velocidade variável acoplados ao eixo do gerador. Com isso, pode-se escolher o equipamento apropriado às condições de vento de determinada região.

Outro aspecto que pode ser destacado quanto à importância de ensaios em laboratório, é a validação experimental de dados fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos. Esses

dados, em geral, são obtidos em condições diferentes das condições de uso final da máquina e, assim, os resultados obtidos em campo podem comprometer o desempenho informado, haja vista que os valores obtidos podem se encontrar abaixo do esperado.

O presente trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema de testes para geradores elétricos a serem utilizados como aerogeradores de pequeno porte. De maneira resumida, o procedimento de ensaio consiste no seguinte: o equipamento em teste tem seu eixo acoplado ao eixo de um motor, que funciona como máquina primária, e cuja velocidade angular pode ser controlada. A partir daí, são aplicados diferentes valores de velocidade e, para cada valor fornecido pelo motor, são medidos os valores de tensão e corrente (bem como observadas as respectivas formas de onda dessas grandezas) na saída do gerador. De posse desses valores, é possível calcular a potência elétrica disponível na saída da máquina e traçar o perfil de geração característico do equipamento.

A estrutura deste trabalho apresenta-se conforme descrito a seguir:

No capítulo 1 é realizada uma breve explanação sobre algumas características gerais de aerogeradores de pequeno porte, bem como as tecnologias de geradores elétricos utilizados nessas máquinas. É dada ênfase para a topologia de geradores síncronos com ímãs permanentes, por ser a configuração mais utilizada em sistemas de pequeno porte. É apresentado um gerador desenvolvido no grupo de pesquisa GEDAE/UFPA, com vistas em uma aplicação em aerogerador. São citados também algumas implementações de sistemas eólicos de pequeno porte na Região Amazônica, de modo particular no estado do Pará.

O capítulo 2 descreve os equipamentos constituintes de um sistema de testes de geradores elétricos desenvolvido em laboratório, os quais constituem uma bancada para ensaios. Descreve também um sistema de aquisição de dados, e um sistema de controle de velocidade angular. Nessa bancada de testes é possível levantar a curva característica de um gerador elétrico, utilizado em um aerogerador, que relaciona a potência elétrica de saída com valores de velocidade de vento. Além disso, nesse capítulo são apresentados os modelos matemáticos utilizados para relacionar os valores de velocidade de vento com a rotação fornecida ao motor.

O capítulo 3 apresenta alguns resultados obtidos com o sistema de monitoração. São apresentadas as formas de onda das tensões trifásicas produzidas em um gerador elétrico de pequeno porte, desenvolvido no laboratório GEDAE para aplicações em regimes de baixas velocidades de vento, bem como os resultados obtidos com um gerador comercial. Por meio do controle da velocidade angular de um motor de indução trifásico que compõe o sistema de testes, é simulado o comportamento de alguns rotores eólicos, cujas características

aerodinâmicas (coeficiente de potência, velocidade de partida, inicial, etc.) servem de entrada para o programa computacional que controla a velocidade do motor. O propósito dessa simulação é reproduzir, por meio do ensaio em bancada, o comportamento desses rotores sob determinadas condições de vento, a fim de se levantar a curva de potência dos equipamentos em teste (potência ativa gerada em função da velocidade de vento).

Com base nos resultados alcançados são apresentadas ao final desta dissertação as conclusões sobre a bancada experimental desenvolvida, como também são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 1

AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

1.1. Características e tecnologias de geradores de pequeno porte

Os aerogeradores são conversores eletromecânicos de energia que transformam a energia cinética do vento em energia elétrica. Esses equipamentos possuem as seguintes formas de classificação: conforme sua potência nominal; de acordo com as forças predominantes no movimento rotação (forças de sustentação ou de arrasto); e conforme os tipos de geradores elétricos que os constituem (geradores síncronos ou assíncronos). Com base na definição de aerogeradores e agrupando-os de acordo com sua potência nominal, tem-se a seguinte classificação (NIELSEN, 2010):

- *Pequeno porte*: potência nominal menor que 100 kW;
- *Médio porte*: potência nominal entre 100 kW e 1.000 kW;
- *Grande porte*: potência nominal maior que 1.000 kW;

Outra forma de classificação que pode ser mencionada é quanto à orientação do rotor. Aerogeradores de pequeno porte também são classificados como de eixo horizontal ou de eixo vertical. Entre os aerogeradores de eixo vertical são encontradas, mais comumente, dois tipos diferentes de turbinas, denominadas de Savonius e Darrieus. A principal diferença entre essas duas configurações está no tipo predominante de força que atua nas pás para realização do movimento. As turbinas do tipo Savonius efetuam seu movimento através do uso da força de arrasto que o vento provoca nas pás. As do tipo Darrieus, por outro lado, utilizam predominantemente a força de sustentação.

Essas forças surgem em decorrência da movimentação da massa de ar em torno do perfil aerodinâmico das pás do aerogerador. A força de sustentação, cuja direção é perpendicular à direção do ar incidente, surge em função da diferença de pressão existente entre a parte inferior e a parte superior do perfil. A força de arrasto, que possui direção paralela à direção do fluxo de ar, existe tanto por conta do atrito viscoso entre esse fluxo e o material que compõe a pá, como também pela diferença de pressão que existe entre o bordo de ataque (região da pá em contato com o fluxo incidente) e o bordo de fuga (região posterior da pá). A figura 1.1 ilustra ambas as forças, as regiões mencionadas e o ângulo formado pelo fluxo de ar e a linha de corda, denominado de ângulo de ataque (Manwell, 2009).

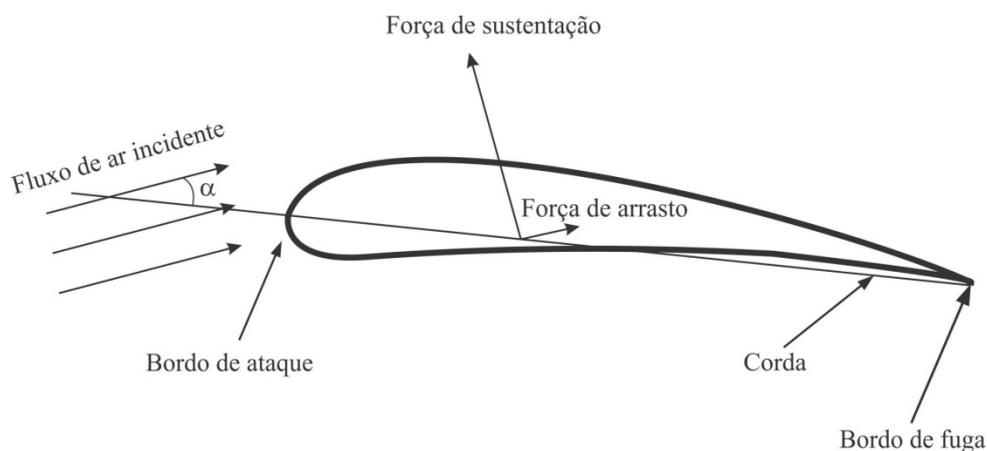


Figura 1.1 - Ilustração das forças atuantes em um perfil aerodinâmico em função da incidência do vento (adaptado de Manwell, 2009).

Ambas, porém, são menos utilizadas em aerogeradores que as turbinas de eixo horizontal. Embora seja possível encontrar turbinas de eixo horizontal que funcionam com base na força de arrasto (em aplicações de bombeamento de água, por exemplo), a maioria faz uso predominante da força de sustentação. As máquinas baseadas na força de sustentação apresentam elevada velocidade de rotação (muitas vezes maior que a velocidade do vento incidente), alto rendimento aerodinâmico e baixo torque, quando comparadas às máquinas que usam a força de arrasto. Essas características tornam-nas preferíveis para aplicação em geração de energia elétrica, justificando assim, sua maior utilização. Dessa forma, em virtude de seu uso mais abrangente, portanto, o presente trabalho dá ênfase aos aerogeradores de eixo horizontal.

A utilização desses equipamentos em países mais desenvolvidos tem se tornado comum com o passar do tempo. Em décadas passadas seu uso restringia-se às aplicações em sistemas não conectados à rede, armazenando-se a energia elétrica gerada em bancos de baterias para uso posterior. Atualmente, consumidores residenciais já utilizam essas máquinas em suas casas, injetando energia diretamente na rede. Nos Estados Unidos, por exemplo, existem incentivos financeiros governamentais que estimulam a adoção de aerogeradores de pequeno porte em residências, reduzindo, dessa forma, o consumo de energia proveniente da rede convencional (AWEA, 2010).

No Brasil, a aplicação de aerogeradores de pequeno porte ainda é reduzida, embora o país possua um grande potencial para geração de eletricidade através da fonte eólica, em especial nas regiões litorâneas. Em alguns estados, como em Pernambuco (na ilha de Fernando de Noronha) e no Pará (na ilha do Marajó e em diversos municípios do interior do estado), existem sistemas eólicos de pequeno porte capazes de suprir a demanda de pequenas

comunidades isoladas, não atendidas pelas concessionárias locais de energia elétrica (FRADE, 2000).

No que diz respeito ao aproveitamento do recurso eólico, pode-se dizer que as tecnologias mais modernas na construção de aerogeradores de pequeno porte objetivam maximizar o aproveitamento da energia contida nas massas de ar, levando em conta alguns aspectos como:

- Disponibilidade de recurso disponível no local de instalação da máquina (altos ou baixos valores de velocidade de vento);
- Conexão ao sistema elétrico local;
- Emissão de ruído acústico;
- Desempenho aerodinâmico;
- Situações climáticas extremas;
- Integração com o meio ambiente;
- Impacto visual.

Os primeiros aerogeradores de pequeno porte utilizavam geradores elétricos de tensão contínua. Com o avanço da eletrônica de potência nos últimos anos, entretanto, a utilização de geradores de tensão alternada trifásicos acabou tornando-se predominante. Essa mudança ocorreu, também, por conta da maior parte das cargas supridas pelas máquinas serem atendidas em corrente alternada (WOOD, 2011). As configurações mais utilizadas atualmente em aerogeradores de pequeno porte são, então, de geradores trifásicos assíncronos e síncronos. Dentre esses dois tipos, os geradores síncronos de ímãs permanentes têm ganhado destaque em relação aos assíncronos, por motivos apresentados ao longo do texto.

Embora a maioria dos modernos aerogeradores de pequeno porte não utilize mais geradores de tensão contínua, algumas características desses geradores podem ser mencionadas, para fins comparativos: geradores DC possuem enrolamentos de campo, os quais necessitam de alimentação para produzir o campo magnético. Esse fato resulta em uma diminuição do rendimento global dessa máquina, quando comparado com o rendimento do gerador de ímãs permanentes, haja vista que as perdas de energia decorrentes da corrente de campo são contabilizadas. Além disso, possuem também escovas e um sistema comutador, os quais se desgastam com o tempo e exigem uma manutenção constante. Existe também a configuração de geradores DC sem escovas (*brushless*), os quais representam um aperfeiçoamento em relação aos modelos citados, haja vista que possuem perdas reduzidas e,

portanto, maior eficiência em relação aos modelos com escovas. Por fim, em virtude dos geradores DC convencionais serem constituídos por um número maior de componentes, acabam por possuir uma menor relação entre a potência elétrica de saída e seu peso, em comparação com as máquinas trifásicas.

Quanto aos geradores assíncronos (ou geradores de indução), ainda são utilizados em alguns modelos de aerogeradores de pequeno porte, embora estejam perdendo espaço para os geradores de ímãs permanentes. Algumas particularidades vantajosas desses equipamentos, que os tornam comercialmente aplicáveis, são: possuem custo reduzido (em relação aos modelos com ímãs permanentes), devido à sua fabricação em massa; são robustos e podem ser facilmente repostos em caso de avaria; não apresentam a indesejável característica de torque pulsante e não precisam de escovas nem comutador. Como desvantagens, pode-se citar o fato de necessitarem de auto-excitação externa, provida por meio de um banco de capacitores, para início da geração; necessitam também de uma caixa de multiplicação de velocidades para aplicações em aerogeradores de pequeno porte, pois operam em velocidades relativamente elevadas; modelos de pequena potência (menores que 5 kW) têm eficiência mais baixa, pois possuem maior resistência elétrica nos enrolamentos do rotor, o que acarreta maiores perdas por efeito Joule (WOOD, 2011).

Os geradores síncronos com ímãs permanentes são a topologia mais utilizada em aerogeradores de pequeno porte, pois possuem vantagens significativas, dentre as quais podem-se citar: dispensam o uso de caixa de multiplicação de velocidades, pois operam com baixa rotação, fato que reduz seu peso e torna a instalação mais fácil de ser executada; apresentam menores perdas de energia, haja vista que sua excitação dá-se através do uso de ímãs permanentes; dispensam o uso de escovas e anéis comutadores, já que a energia é coletada diretamente dos enrolamentos do estator. Essas vantagens, entretanto, são contrapostas pelo fato do custo dessas máquinas ser relativamente elevado, quando comparado aos dos geradores assíncronos de indução, e também pela possibilidade de perda das características magnéticas dos materiais usados em sua construção, ao longo de sua vida útil (em torno de 20 anos). Outra característica indesejável presente nesses dispositivos é a presença de torque pulsante (apenas para o caso de máquinas que apresentem ranhuras no estator), o qual pode levar a um desgaste prematuro dos componentes da máquina, reduzindo, assim seu tempo de vida útil.

Dentro da categoria dos geradores síncronos com ímãs permanentes, pode-se expandir ainda a classificação em:

- geradores síncronos com fluxo radial;

- geradores síncronos com fluxo axial, com estator toroidal ou estator de duas faces;
- geradores síncronos com fluxo transversal.

1.1.1. Gerador síncrono com fluxo radial

Geradores com fluxo radial representam a concepção de projeto mais usual do gerador síncrono de ímãs permanentes (BRANCO, 2010). Nos geradores com fluxo radial, o comprimento do estator e o diâmetro do entreferro podem ser escolhidos independentemente. Isto implica que os geradores com fluxo radial podem ser feitos com diâmetros pequenos (GRAUERS, 1996a). A utilização de entreferros pequenos eleva o valor da densidade de fluxo magnético nos mesmos, levando à presença de forças magnetomotrizes elevadas no interior das estruturas do estator e do rotor. Uma das principais funções dessa concepção é atingir um valor aceitável de densidade de fluxo no entreferro do gerador. A densidade de fluxo no entreferro deve ser de pelo menos 1 T (SPOONER *et al*, 1996 e AKHMATOV *et al*, 2003).

A figura 1.2a mostra a estrutura com excitação através de ímãs instalados na superfície e um enrolamento monofásico no estator. Quando excitado por ímãs instalados na superfície, a densidade de fluxo residual do material magnético é maior que a densidade de fluxo no entreferro do gerador, ou seja, maior que 1 T. Quando da escolha da estrutura com ímãs instalados na superfície, são necessários ímãs mais eficientes e também mais caros, por exemplo, de NdFeB (Neodímio-Ferro-Boro), que apresentam valor elevado de fluxo residual (GRAUERS, 1996a e LAMPOLA, 2000). A vantagem da excitação com ímãs instalados na superfície é que a estrutura do rotor é simples e barata, e seu peso é relativamente reduzido. Os ímãs permanentes são fixados na superfície de montagem do rotor.

A figura 1.2b ilustra a estrutura com excitação através de ímãs instalados na superfície, e um enrolamento trifásico. A estrutura do rotor é simples e os enrolamentos das bobinas do estator estão deslocados de 120 graus elétricos.

A densidade de fluxo no entreferro do gerador pode ser aumentada através da utilização de arranjos de aço juntamente com ímãs permanentes (GRAUERS, 1996a e SPOONER *et al*, 1996). Nesta concepção os ímãs permanentes são posicionados no interior da estrutura do rotor. Os circuitos magnéticos conduzem e concentram a densidade de fluxo nas suas superfícies no entreferro. A densidade de fluxo na superfície do ímã permanente

pode ser relativamente pequena, mas a densidade de fluxo no entreferro do gerador é admissível apenas se for elevada. Exemplificando, se forem utilizados ímãs de ferrita, caracterizados por uma densidade de fluxo residual de cerca de 0,4 T, juntamente com os circuitos magnéticos de concentração de fluxo, a densidade de fluxo no entreferro será de aproximadamente 1 T (GRAUERS, 1996a e SANTOS, 2005).

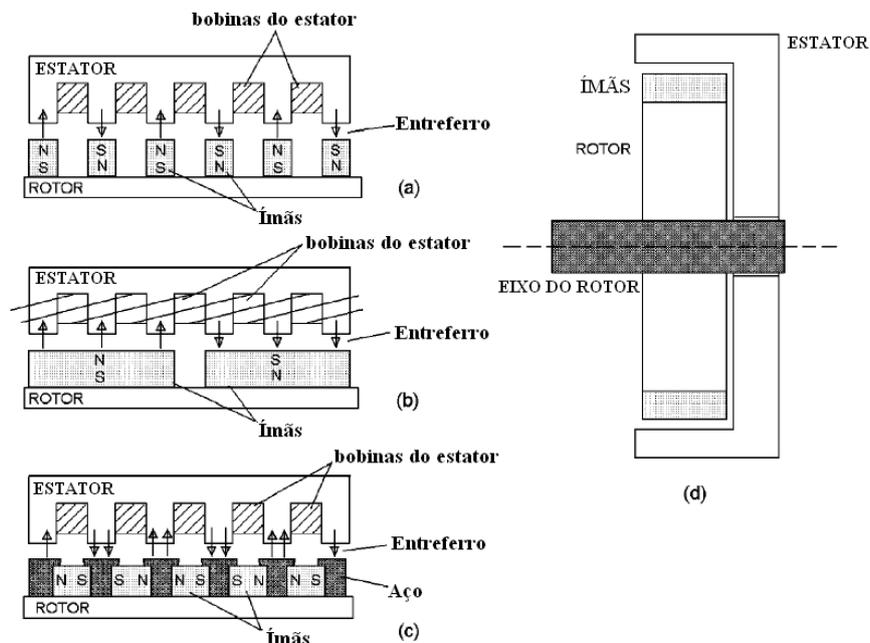


Figura 1.2 – Gerador com fluxo radial excitado através de ímãs permanentes: a) com ímãs instalados na superfície e enrolamento monofásico; b) com ímãs instalados na superfície e enrolamento trifásico; c) com concentração de fluxo e enrolamento monofásico; d) seção transversal dessa concepção. (BRANCO, 2010)

1.1.2. Gerador com fluxo axial e excitação através de ímãs permanentes

A estrutura usual de um gerador síncrono de ímã permanente com fluxo axial é ilustrada na figura 1.3. A figura representa um gerador com estator toroidal, um enrolamento inserido entre os discos do rotor, e dois discos de rotor sustentando os ímãs permanentes (MULJADI *et al*, 1998). Existem duas maneiras possíveis de dispor a estrutura com ímãs permanentes: com ímãs instalados na superfície com uma densidade de fluxo consideravelmente grande, situação ilustrada na Figura 1.3a, ou utilizando ímãs de ferrita de baixo custo com circuitos magnéticos de concentração de fluxo. Esse último arranjo é geralmente denominado de “ímãs embutidos” (GRAUERS, 1996a e AKHMATOV *et al*, 2003).

A figura 1.3b ilustra a seção transversal da estrutura com ímãs permanentes instalados na superfície. Os núcleos do estator e do rotor podem ser constituídos de fitas de aço silício,

como em transformadores. A estrutura da máquina pode, entretanto, dispensar a utilização de núcleos no estator ou no rotor (GRAUERS, 1996a). Quando da escolha dessa configuração do gerador, deve-se considerar que o mesmo será utilizado em aerogeradores, levando à necessidade de operar com baixas velocidades e apresentar dimensões que possibilitem um fácil manuseio.

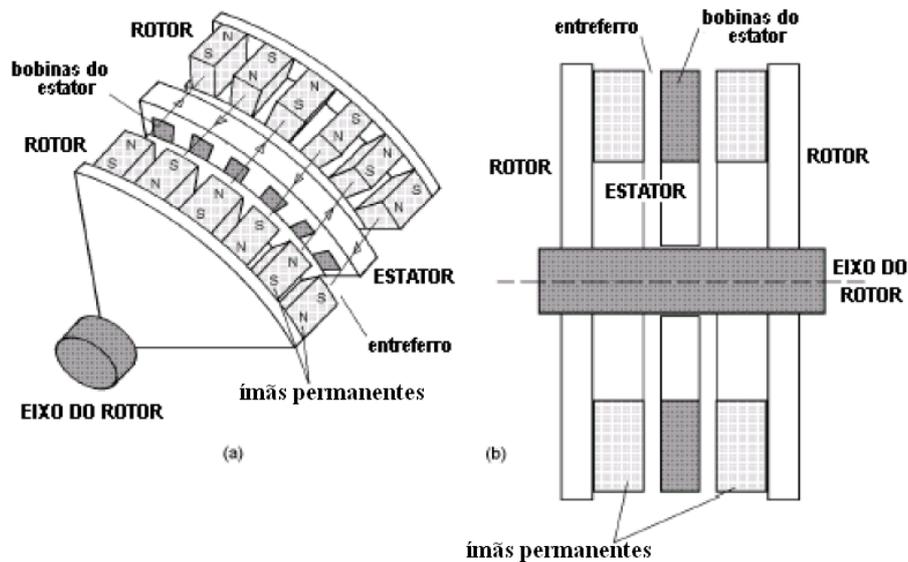


Figura 1.3 – Gerador com fluxo axial excitado através de ímãs permanentes: a) estrutura em uma única peça, com um estator e dois discos de rotor; b) seção transversal destacada. (BRANCO, 2010)

Uma forma particular de gerador com ímãs permanentes e de fluxo axial que é apresentada neste trabalho é a da máquina Torus. Essa configuração consiste de um dispositivo eletromagnético girante que apresenta configuração sem ranhuras, de estator toroidal, com rotor constituído por duplo disco magnético, com ímãs permanentes e sem a utilização de escovas, conforme ilustra a figura 1.4.

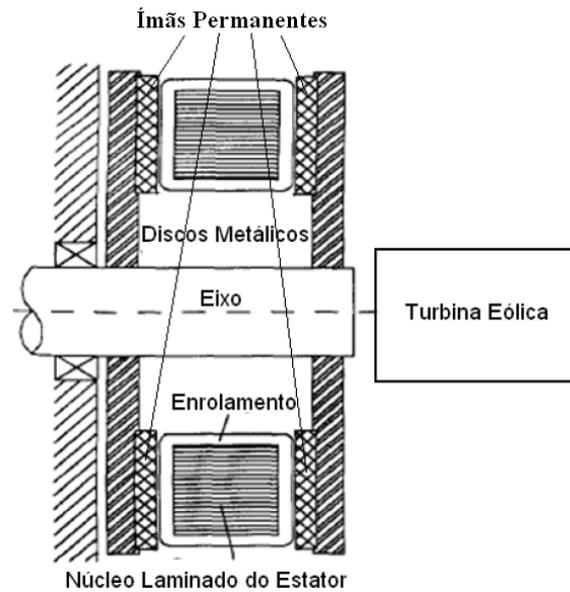


Figura 1.4 – Seção transversal de um gerador com estator toroidal e fluxo axial: vista transversal de uma máquina Torus. (BRANCO, 2010)

Nessa ilustração, o rotor é constituído por dois discos metálicos, um em cada lado do estator, nos quais são colocados ímãs permanentes. Para fins de cálculo da tensão induzida na bobina, a parte ativa dos condutores corresponde à porção radial em frente aos ímãs. Pode-se considerar que a máquina compreende duas metades independentes, segundo uma direção axial. A denominação Torus está associada à natureza toroidal do núcleo e do enrolamento do estator.

Alguns aspectos operacionais da máquina são (BRANCO, 2010):

- a topologia da máquina conduz a um comprimento axial pequeno, com relação potência/peso elevada, favorecendo a sua integração diretamente com a turbina eólica, formando um conjunto bastante compacto;
- os discos metálicos e os ímãs permanentes atuam como ventiladores, oferecendo ventilação e resfriamento para os enrolamentos do estator, mesmo com baixa velocidade rotacional, favorecendo um alto carregamento elétrico;
- a ausência de ranhuras e o enrolamento de entreferro oferecem baixos valores de indutâncias mútuas e de dispersão;
- os enrolamentos são relativamente curtos, oferecendo baixa resistência, o que favorece uma regulação de tensão aceitável sob condições de carga;
- a ausência de ranhuras permite desprezar a atração magnética entre os ímãs permanentes montados no rotor e o estator – *cogging torque*. Este torque representa

um efeito indesejável que contribui para a presença de oscilações (*ripple*) na saída, vibração e ruído. Esses efeitos são eliminados na máquina Torus.

O projeto de uma máquina Torus é caracterizado pelos seguintes parâmetros:

- diâmetros interno e externo do núcleo do estator;
- número de polos;
- material magnético e espessura;
- número de fases do estator;
- número de espiras por bobina;
- tamanho do condutor.

A projeção parcial da máquina Torus, ilustrada na figura 1.5, segundo uma direção circunferencial, no sentido radial para o seu interior, é apresentada na figura 1.5. A coordenada x representa a direção circunferencial e a coordenada y representa a direção axial.

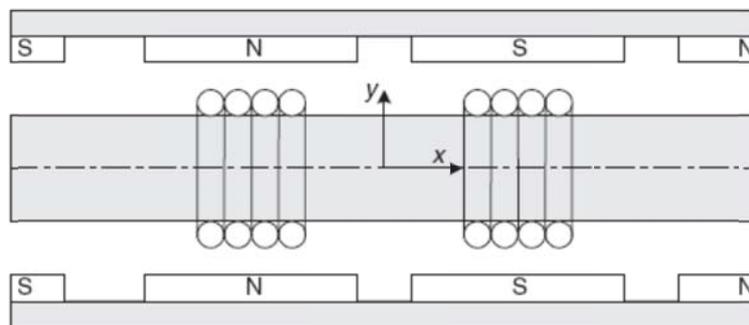


Figura 1.5 - Projeção parcial da máquina Torus segundo uma direção circunferencial, no sentido radial para o seu interior. (SPOONER e CHALMERS, 1992 e BUMBY *et al*, 2004)

1.1.3. Gerador com fluxo transversal e excitação através de ímãs permanentes

Os geradores de fluxo transversal são projetados de modo a apresentar um maior aproveitamento do fluxo magnético (GRAUERS, 1996a e WEH, 1995). Os geradores com fluxo transversal podem também ser construídos com entreferros de fluxo axial e de fluxo radial. Quando construído com entreferros radiais, o gerador tem um disco do estator com duas faces e, entre este estator, um disco de rotor com ímãs permanentes. Quando construído

com um entreferro axial, o gerador tem um estator cilíndrico interno e outro externo, e um rotor cilíndrico de ímãs permanentes entre os mesmos.

A Figura 1.6 mostra a configuração simplificada estator-rotor para enrolamentos monofásicos das bobinas do estator (AKHMATOV *et al*, 2003).

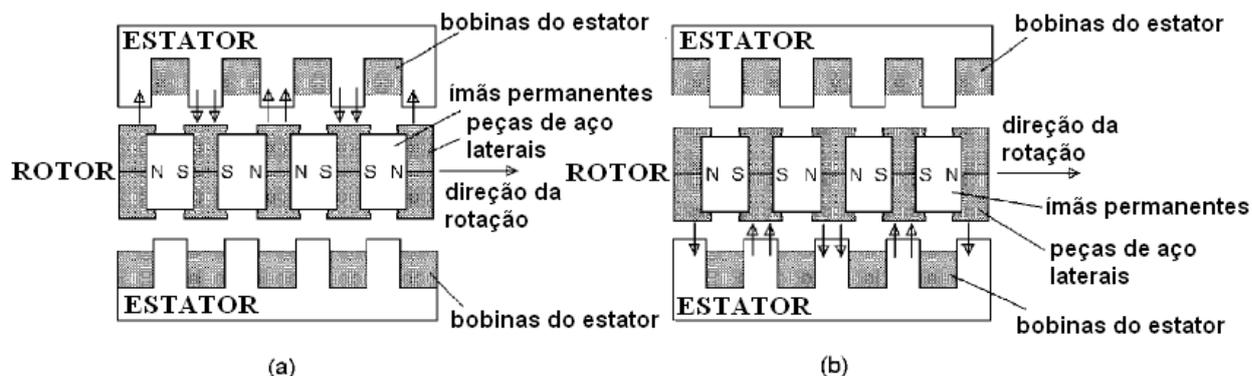


Figura 1.6 - Gerador com fluxo transversal excitado por ímãs permanentes. Configuração de entreferro axial a considerar: a) bobinas do estator externas direcionando os passos de fluxo; b) bobinas do estator internas direcionando os passos de fluxo. (adaptado de AKHMATOV *et al*. 2003)

A principal diferença entre os geradores com fluxo transversal e os geradores com fluxo axial ou radial, é que nos geradores com fluxo transversal é possível aumentar o espaço para o enrolamento sem diminuir o espaço para o fluxo principal. Isto permite reduzir as perdas do cobre. Contudo, a estrutura eletromagnética dos geradores com fluxo transversal é mais complexa que no caso dos geradores com fluxo radial ou axial. Isto pode tornar o processo de fabricação dos mesmos mais caro. (BRANCO, 2010)

Uma aplicação de geradores síncronos em aerogeradores é na conexão direta à rede elétrica, para a qual é necessária a utilização de um conversor estático de potência (inversor de tensão) que atua como interface entre a máquina e a rede. A figura 1.7 ilustra o esquema básico de uma máquina síncrona.

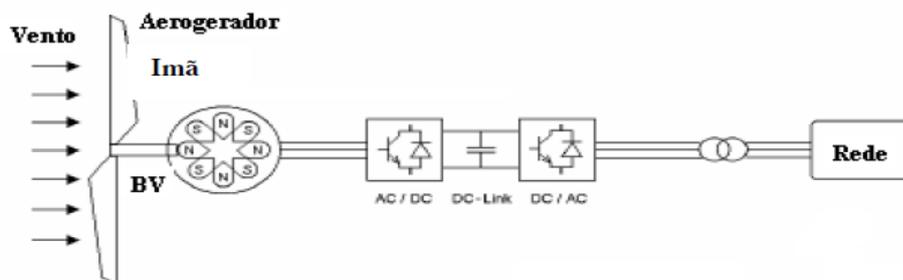


Figura 1.7 – Máquina síncrona de ímãs permanentes utilizadas em aerogerador. (MELO, 2009)

1.2. Outras partes constituintes de aerogeradores de pequeno porte

Os pequenos aerogeradores de eixo horizontal são compostos basicamente por um rotor, que aproveita a energia cinética da massa de ar incidente, tornando-a disponível no eixo mecânico girante acoplado ao gerador elétrico; por um gerador elétrico, que converte a rotação do eixo mecânico em eletricidade; e por um leme, que posiciona o aerogerador conforme a direção do vento, a fim de se obter aproveitamento ótimo do recurso eólico. Esse conjunto é sustentado por uma torre, a qual mantém a máquina na altura projetada para captação do vento. Conforme a aplicação, pode haver ainda a existência de inversores de tensão, os quais convertem tensão contínua em tensão alternada para ser injetada diretamente na rede elétrica; retificadores e controladores de carga, que convertem a tensão alternada gerada pela máquina em tensão contínua e gerenciam a energia gerada, distribuindo-a entre a carga a ser atendida e o carregamento de um banco de baterias, respectivamente. A Figura 1.8, mostra um típico pequeno aerogerador de eixo horizontal e alguns de seus componentes.

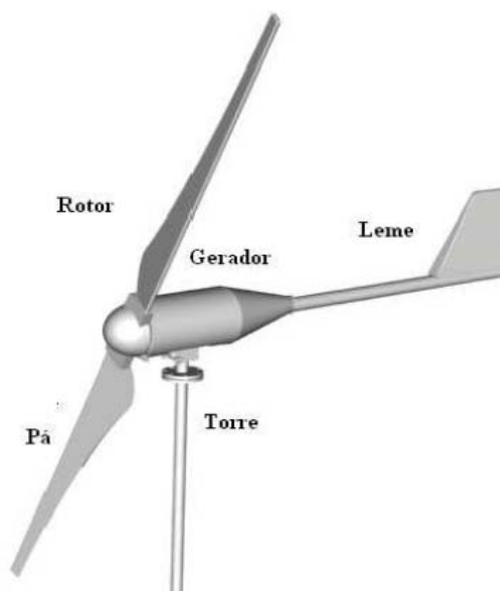


Figura 1.8 – Componentes de um aerogerador de pequeno porte. (MELO, 2009)

1.2.1. Rotor

O rotor é um dos principais componentes de uma máquina eólica, e tem como função transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de eixo rotativo. É constituído pelo cubo (peça que fixa as pás ao eixo girante) e pelas pás, que produzem o torque necessário para movimentação do eixo do rotor.

Os aerogeradores possuem um número de pás variado (embora a grande maioria dos aerogeradores com turbinas de eixo horizontal possuam apenas 3 pás), podendo ser construídas em madeira, fibra de vidro ou outros materiais.

As pás dos aerogeradores têm perfis aerodinâmicos diversificados, de forma a aumentar a sua eficiência na captação da energia contida em determinada faixa de velocidades de vento. Elas podem ser constituídas de um único perfil ou uma combinação de vários perfis.

1.2.2. Leme

O leme tem a função de manter o plano do rotor sempre perpendicular à direção do vento, de modo a maximizar a captação da energia da massa de ar. Os pequenos aerogeradores utilizam apenas o leme para essa função, não possuindo sensores de direção de vento ou mecanismos que ajustem o rotor para a direção de vento predominante. Esse componente pode ser construído com fibra de vidro, chapa de alumínio ou de ferro galvanizado, ou outros materiais. No seu projeto são considerados os detalhes associados à força de arrasto produzida pelo vento na superfície do leme e a força de atrito dos rolamentos, ou das engrenagens da plataforma deslizante.

1.2.3. Torre

A torre é a parte do sistema de geração eólica que sustenta o aerogerador a uma altura onde a velocidade do vento é maior (tendo como referência a velocidade ao nível do solo) e onde o fluxo de ar apresenta menos turbulência pelos efeitos do atrito viscoso que ocorrem caso a máquina seja instalada próxima ao solo. A altura da torre é limitada pela relação entre o seu custo e o acréscimo da energia obtida com a elevação do rotor (MELO, 2009).

As torres normalmente são construídas em metal (aço). As torres de aço podem ser tubulares ou treliçadas, e serem do tipo autoportante ou utilizarem cabos de aço fixando-as ao solo (estais). O estaiamento reduz o material utilizado na construção da torre, porém exige uma maior área disponível para a sua instalação.

Os critérios para a escolha entre as torres tubulares ou treliçadas, geralmente ficam limitados ao custo e/ou ao impacto visual. Em áreas urbanas, em função da limitação de espaço, as torres estaiadas não são recomendadas.

Além das torres de aço, existe a opção pelas torres de concreto, embora essa opção esteja, em geral, direcionada para os grandes aerogeradores, em virtude de seu menor custo e da possibilidade de construção no local da instalação. Hoje o seu tamanho está limitado à quantidade de aço usado na armação que, para as torres dos grandes aerogereadores, já está próxima da quantidade de aço de uma torre treliçada de mesmo porte (MELO, 2009).

1.3. Aerogerador desenvolvido no GEDAE

Nesta seção são apresentadas as características de um gerador síncrono trifásico com ímã permanente desenvolvido no GEDAE como parte de um projeto de pesquisa intitulado “Desenvolvimento de Aerogerador de 1 kW com Rotor Adequado para as Condições de Vento da Região Amazônica” (BRANCO, 2010), e cujas características construtivas são: enrolamento do estator composto por 18 bobinas de 100 espiras cada, confeccionadas com fio 21 AWG, distribuídas sobre um núcleo ferromagnético em forma de coroa circular (toroidal) construído com fita de aço silício de grão orientado, apresentando diâmetro interno de 18 cm e diâmetro externo de 27 cm, com largura de 4,5 cm e espessura de 1 cm. Essa estrutura constitui um toróide com 3 conjuntos de 6 bobinas por fase, obedecendo, para cada uma delas e de forma alternada, os sentidos de enrolamento horário e anti-horário. A excitação é produzida por 2 conjuntos de 18 ímãs de NdFeB de formato cilíndrico. Cada conjunto é distribuído em dois discos metálicos que constituem o rotor do gerador, como ilustrado nas figuras 1.9 e 1.10. (BRANCO, 2010)



Figura 1.9 – Protótipo do gerador desenvolvido.



Figura 1.10 - Protótipo do gerador desenvolvido com detalhe do encaixe das pás.

1.4. Utilização de aerogeradores de pequeno porte na Região Amazônica

Na Região Amazônica existem algumas aplicações de aerogeradores de pequeno porte operando em conjunto com outras fontes de geração de energia, formando os denominados sistemas híbridos. Alguns desses sistemas ainda se encontram em operação. Outros, por falta de manutenção adequada, tiveram seu funcionamento comprometido.

Como exemplos de sistemas contendo pequenos aerogeradores operando com outras fontes instalados na Região Amazônica, podem-se citar:

- O projeto do sistema fotovoltaico-eólico da vila Joanes, município de Salvaterra, no estado do Pará, idealizado no ano de 1994, através de doação dos equipamentos por parte do Departamento de Energia dos Estados Unidos (*U.S. Department of Energy – DOE*), de suporte técnico do Laboratório Americano de Energias Renováveis (*National Renewable Energy Laboratory – NREL*) e do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), e contrapartida de fornecimento de demais equipamentos, mão-de-obra e operação por parte da concessionária de energia local, Centrais Elétricas do Pará, onde foram instalados 4 aerogeradores de 10 kW cada, em 4 torres treliçadas e 55 módulos fotovoltaicos, totalizando 10,2 kW_p (PINHO *et al.*, 2008). Esse sistema foi concebido para ser interligado à rede da usina

termelétrica do município de Salvaterra, com o objetivo de aliviar a geração a diesel nos momentos de déficit e horários de ponta.

- O sistema híbrido solar-eólico-diesel da Vila de São Tomé, município de Maracanã, interior do estado do Pará, composto por uma turbina eólica de 7,5 kW, um sistema fotovoltaico de 3,2 kWp e um gerador a diesel de 20 kVA para atendimento da demanda local de energia. Esse projeto contou com o apoio financeiro da Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, além da colaboração da CELPA e da Agência Estadual de Regulação e Controle de Serviços Públicos do Pará – ARCON (BLASQUES, 2005).
- O sistema híbrido eólico-diesel instalado na comunidade de Praia Grande, estado do Pará, o qual conta com duas turbinas eólicas de 10 e 15 kW, respectivamente, dois grupos geradores diesel de 7,5 kVA cada, dois sistemas de armazenamento compostos de 18 e 20 baterias de 12 V/150 Ah cada e os equipamentos de condicionamento de potência (BISPO, 2000).
- O sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel da vila de Tamaruteua, município de Marapanim, no estado do Pará, que é composto por um arranjo fotovoltaico de 1,92 kW_p com módulos de 120W_p; dois aerogeradores de 7,5 kW instalados em duas torres treliçadas (de 24 m e 30 m de altura); um grupo gerador diesel de 30 kVA (24 kW); dois retificadores/controladores de carga e dois transformadores de 30 kVA cada; um banco de baterias com 64 unidades de chumbo-ácido, 6V_{cc}/350 Ah e três inversores estáticos de 5,5 kW cada. O sistema foi implantado em junho de 1999 e abastecia residências, escola, comércios, igreja, prédios de uso diversos (salga de peixe, depósito e casa de farinha) e a iluminação pública da vila. O projeto foi financiado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Programa do Trópico Úmido (PTU), (PINHO et al., 2008). Esse sistema funcionou adequadamente até o ano de 2001, quando o conjunto de inversores passou a apresentar problemas. A vila passou então a contar apenas com o grupo gerador diesel, até o ano de 2006, quando foi efetuada uma revitalização no sistema. A revitalização possibilitou o acréscimo de 16 módulos fotovoltaicos de 120 W_p cada; um grupo gerador diesel de 40 kVA (32 kW); um

inversor/retificador de 18 kW; e a troca do banco de baterias, que passou a ser constituído por 64 baterias de 185 Ah e 12 V cada. A revitalização teve os subsídios do Ministério de Minas e Energia (MME)/Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (PEREIRA, 2007).

- Na vila de Sucuriju, município de Amapá, no estado do Amapá, existe um sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel, cuja capacidade total instalada de geração é de 105,5 kW. Desse montante, 20 kW_p estão distribuídos em potência fotovoltaica; 37,5 kW em potência eólica (5 aerogeradores de 7,5 kW cada); e 48 kW em um sistema diesel-elétrico. Esse projeto obteve financiamento do Ministério de Minas e Energia (MME) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). (PINHO et al., 2008)

A geração eólica, em geral, atende a carga dessas pequenas comunidades, mas, como ao longo do ano têm-se grandes variações das velocidades médias, ela costuma não ser suficiente para atender a carga durante todo o tempo, mesmo com a instalação de mais máquinas (aerogeradores). Logo, há necessidade de se complementar a geração com outras fontes de energia, como a fonte solar fotovoltaica, ou mesmo com grupos geradores a diesel, objetivando dar maior confiabilidade ao sistema de geração para atendimento da demanda.

De um modo geral, sistemas eólicos de pequeno porte constituem-se em uma boa alternativa para o atendimento de pequenas comunidades isoladas da rede elétrica. Contudo, em função da faixa de velocidades em que esses equipamentos são projetados, não se consegue otimizar sua captação de energia, tendo em conta que essas máquinas funcionam de modo a garantir a potência nominal com velocidades de vento em torno de 12 m/s, valor bem superior às médias obtidas em algumas regiões do interior da Região Amazônica.

1.5. Considerações finais

De um modo geral, o custo para aquisição de aerogeradores de pequeno porte constitui-se na principal barreira à difusão dessa fonte de geração de energia. Por conta disso, diversos países estimulam a aquisição desses equipamentos através de mecanismos financeiros, como a redução das tarifas de consumo de energia ou mesmo utilização de tarifas de compra e venda de energia diferenciadas para o produtor independente.

O Brasil, apesar de possuir um grande potencial eólico para geração de energia elétrica, em especial na região nordeste do país, ainda não possui mecanismos de compra e venda de eletricidade semelhante aos citados, que venha a facilitar a utilização dessa fonte de energia com o uso de pequenos aerogeradores.

Para usar e comercializar com sucesso um pequeno aerogerador no Brasil e, de um modo geral, nos países em desenvolvimento, é interessante que a tecnologia desse equipamento esteja ajustada às possibilidades técnicas locais, porém correspondendo ao estado-da-arte da tecnologia.

A exigência principal é ter a maior confiabilidade, aliada ao menor tempo de paradas para manutenção possível, haja vista que os custos para transportar pessoas qualificadas a fim de realizar reparos em máquinas avariadas podem chegar, conforme as circunstâncias, até a valores maiores que o próprio custo de aquisição da máquina.

Outra exigência que pode ser mencionada é a resistência ao ambiente em que o aerogerador está instalado. É importante que o equipamento esteja devidamente protegido contra a ação de poeira ou areia, a fim de que, a longo prazo, não haja penetração significativa de partículas na estrutura do aerogerador, fato que poderia comprometer a operação, ou mesmo inutilizar a máquina. Em instalações próximas a regiões marítimas, deve-se considerar também a exposição ao ar úmido e ao alto teor de sal.

Assim, podem-se enunciar algumas características desejáveis no projeto de um aerogerador de pequeno porte:

- Utilização em diferentes redes elétricas sem necessidades de adaptações;
- Possibilidade de integração em redes isoladas;
- Alta resistência e confiabilidade;
- Vida útil longa, com longos ciclos de manutenção;
- Montagem simples no local;
- Alto nível de segurança;
- Baixa produção de ruídos.

Uma conclusão a respeito do mercado mundial de pequenos aerogeradores apresentada em AWEA (2010), é que a indústria de turbinas de pequeno porte é um segmento que está se expandindo rapidamente, mas se mantém suficientemente pequeno, de tal maneira que o sucesso de uma empresa que atue nesse ramo depende mais de seus produtos e

estratégias de gestão do que de acordos ou compromissos a nível global para a implantação de sistemas de pequeno porte.

Apesar de atenção dada aos empreendimentos eólicos de grande porte, cuja potência instalada situa-se na ordem de MW, o mercado para equipamentos de pequeno porte pode ser atrativo se os preços da energia gerada por outras fontes tornarem-se elevados ou se a opção pela fonte eólica apresentar-se como solução para o abastecimento de energia de uma comunidade ou habitação que seja desprovida de eletricidade.

CAPÍTULO 2

BANCADA DE TESTES PARA AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

2. Desenvolvimento e construção da bancada de testes para aerogeradores de pequeno porte

Para a realização dos ensaios em geradores elétricos em laboratório foi esboçada, projetada e construída uma bancada, a qual teve aporte financeiro do CNPq por meio dos projetos intitulados “Desenvolvimento de Aerogerador de 1 kW com Rotor Adequado para Condições de Vento da Região Amazônica” e “Bancada para Testes de Desempenho de Geradores Elétricos, Utilizados em Aerogeradores de Pequeno Porte, sob Condições Simuladas de Vento” aprovados nos editais MCT/CNPq/CTEnerg nº28/2006 e MCT/CNPq 15/2007, respectivamente.

A bancada possui uma estrutura metálica de suporte a fim de viabilizar a operação conjunta do gerador a ser avaliado e uma máquina primária. Esta máquina, representada por um motor de indução trifásico controlado por inversor de frequência, é empregada no sentido de simular a operação de uma turbina eólica.

2.1. Descrição da bancada experimental

A figura 2.1 apresenta um diagrama esquemático das partes constituintes do sistema de testes.

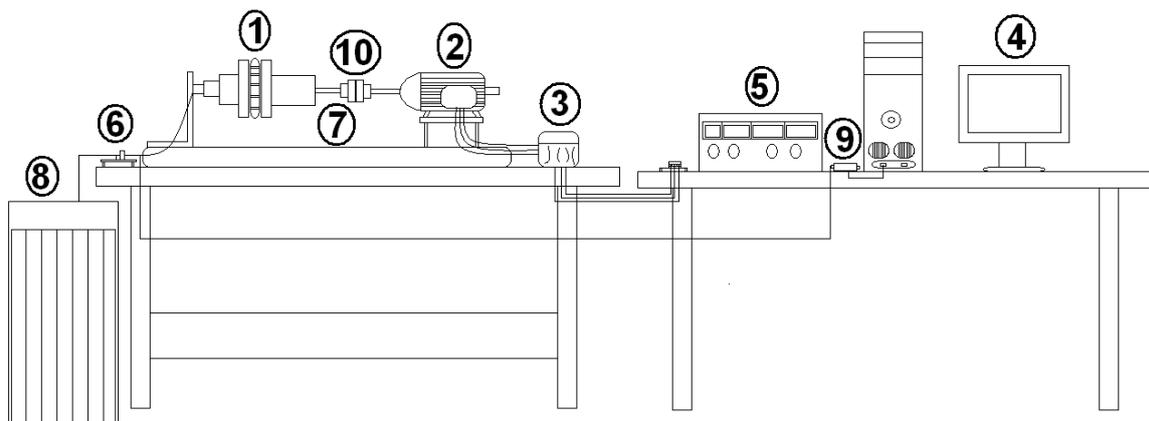


Figura 2.1 – Esboço dos componentes da bancada de testes.

Os componentes indicados na figura 2.1 estão listados conforme a numeração a seguir:

- 1 - Gerador elétrico em teste;
- 2 – Motor de indução;
- 3 – Inversor de frequência;
- 4 – Microcomputador;
- 5 – Fonte de tensão CC;
- 6 – Transdutores de grandezas elétricas e mecânicas;
- 7 – Estrutura metálica de sustentação;
- 8 – Banco de cargas;
- 9 – Módulos de aquisição de dados;
- 10 – Acoplamento.

Uma fotografia do sistema de testes descrito nos parágrafos anteriores e cujo esboço esquemático foi apresentado na figura 2.1, é apresentada na figura 2.2.



Figura 2.2 – Imagem do sistema de teste em bancada.

O esboço e as dimensões das partes integrantes da estrutura de suporte, relacionadas à sustentação do gerador a ser avaliado, são mostrados nas figuras 2.3 e 2.4.

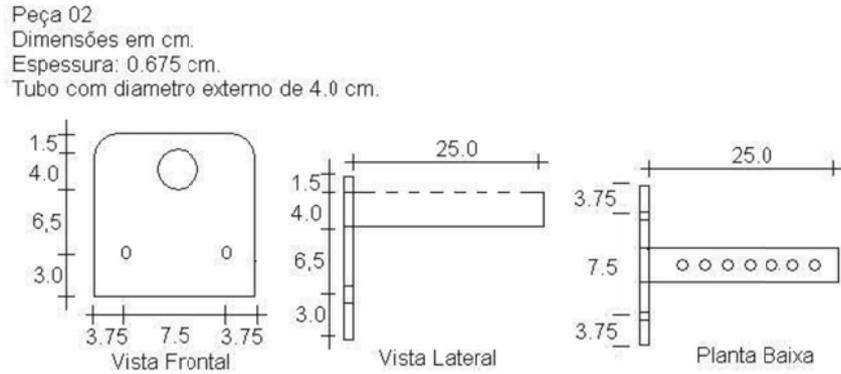
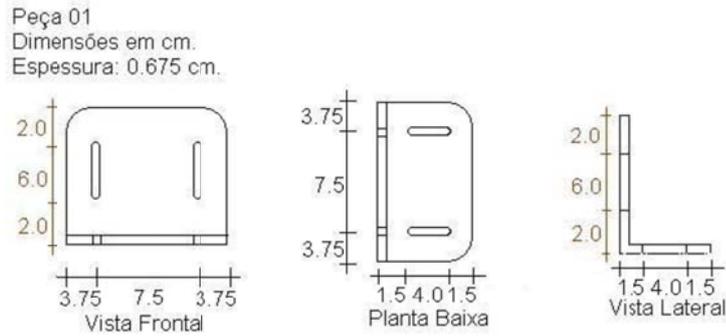


Figura 2.3 – Esboço e dimensões das partes integrantes da estrutura de suporte que sustenta o gerador a ser ensaiado. (BRANCO, 2010)

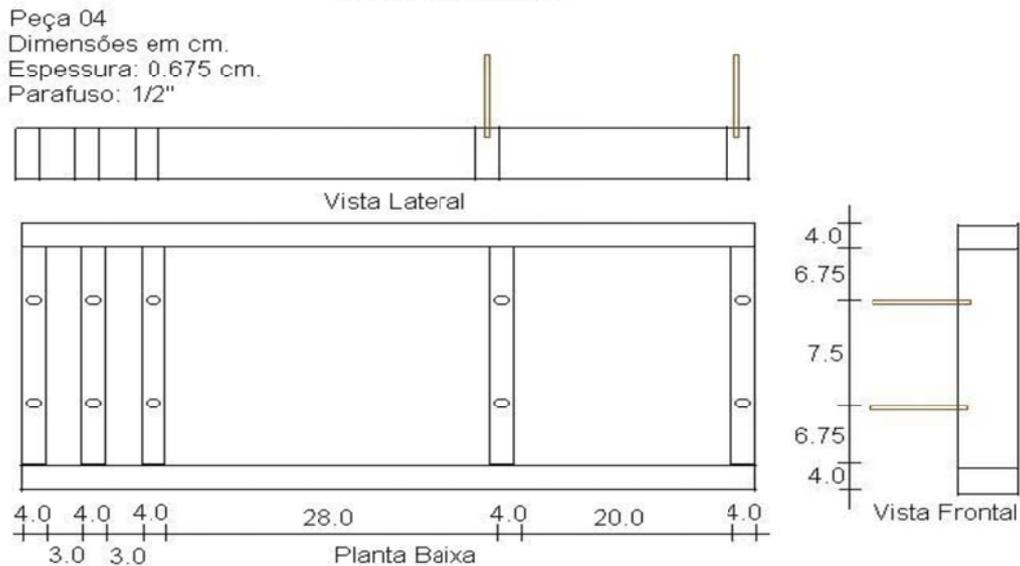
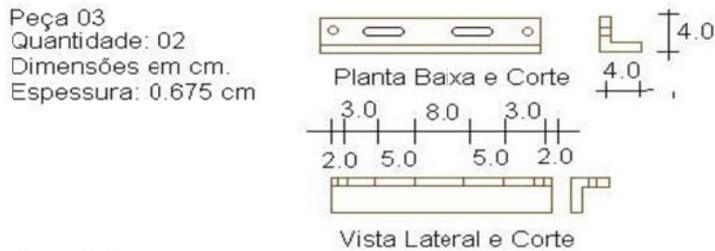


Figura 2.4 – Esboço das partes integrantes da estrutura de suporte, relacionadas à base do conjunto, e à sustentação do motor de indução trifásico. (BRANCO, 2010)

A ligação mecânica entre o gerador a ser avaliado e o motor é realizada com a ajuda de um acoplador - *Acoplamento TSCHAN NOR MEX E67*, que une o eixo do motor a um terminal aplicado na parte externa do disco metálico anterior do rotor elétrico do gerador. O esboço e o dimensionamento do terminal, comum para todas as configurações de geradores desenvolvidas, é exibido na figura 2.5. Na figura 2.6 é mostrada a fotografia da estrutura metálica para suporte do conjunto motor-gerador.

Unidades expressas em centímetros (cm).
Y furo liso distante 0.7 cm da borda, com diâmetro de 3/8" (três oitavos de polegada).

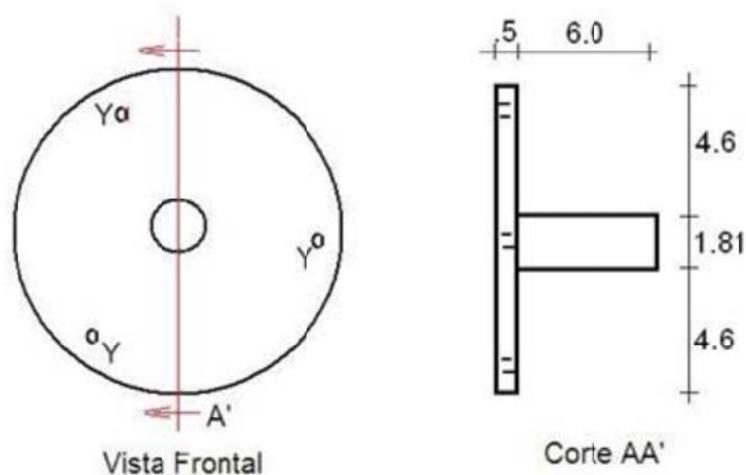


Figura 2.5 – Esboço e dimensões do terminal aplicado na parte externa do disco metálico anterior do rotor elétrico do gerador para o acoplamento com o motor nos ensaios de laboratório. (BRANCO, 2010)

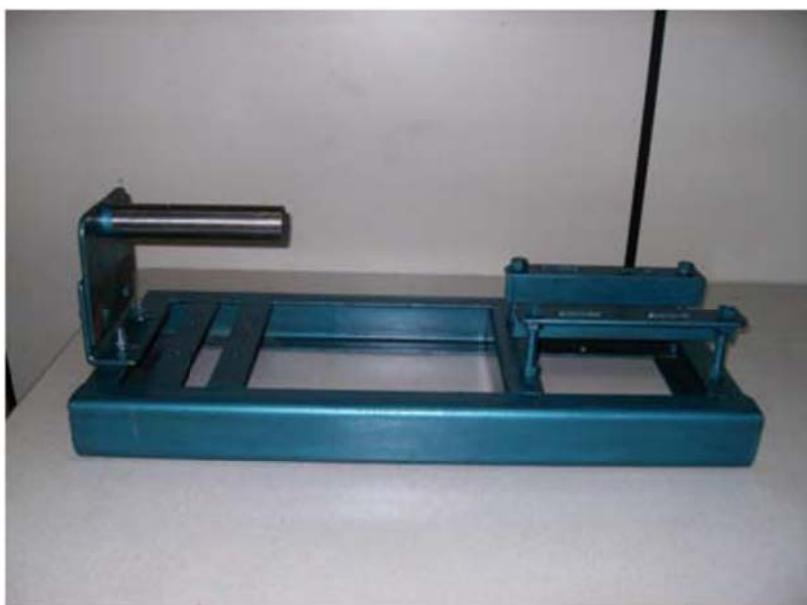


Figura 2.6 – Estrutura de sustentação construída para ensaios no gerador.

2.2. Descrição do sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados é o processo pelo qual um fenômeno físico do mundo real é transformado em um sinal elétrico que é medido e convertido para um formato digital para que possa ser processado e/ou armazenado em um computador (PARK, 2003).

A conversão do fenômeno físico em sinais elétricos é realizada por meio de dispositivos denominados sensores ou transdutores (AUSTERLITZ, 2003). Sinais elétricos são utilizados em virtude de sua versatilidade de processamento e codificação de informações. Entretanto, existe a necessidade de se adequar os sinais gerados pelos transdutores ao formato utilizado pelo dispositivo que vai efetuar o processamento, em geral um microcomputador. De um modo geral, os sinais dos transdutores são analógicos, ou seja, possuem variações contínuas ao longo do tempo, ao passo que os sinais dos dispositivos de processamento são discretizados e quantizados (portanto, sinais digitais). É preciso, assim, utilizar um dispositivo que realize a devida conversão entre essas duas formas de sinais e, além disso, é interessante que esse dispositivo possua uma conexão direta com o microcomputador. No sistema de testes deste trabalho, esse dispositivo é uma placa de aquisição de dados com conexão USB.

Na bancada de testes de geradores desenvolvida neste trabalho, o sistema de aquisição de dados é composto pelos seguintes elementos: transdutores de grandezas elétricas (tensão e corrente); uma placa de aquisição de dados, conectada ao computador através da porta USB; um microcomputador; e um inversor de frequência, para controlar a velocidade de rotação do motor de indução. A figura 2.7 apresenta os componentes da bancada de testes.

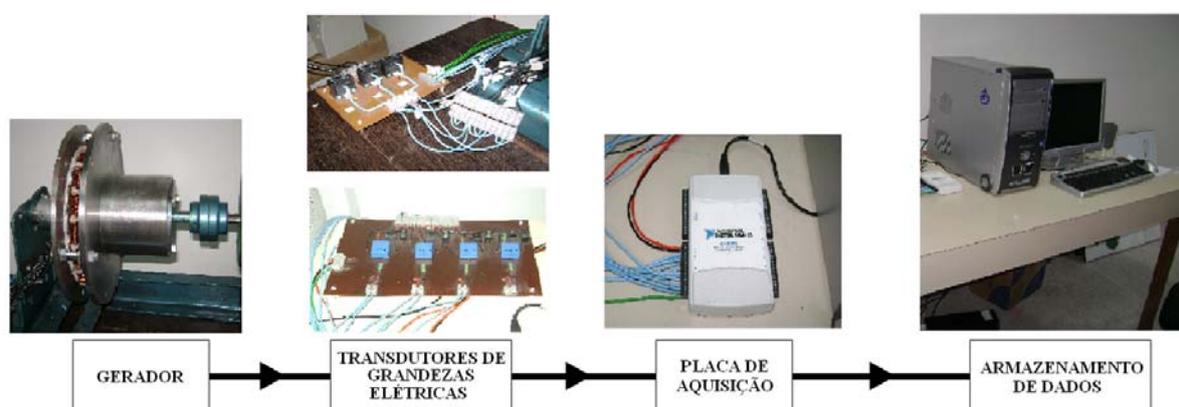


Figura 2.7 – Representação esquemática do sistema de medição

2.2.1. Placa de aquisição de dados

Conforme explicado anteriormente, a placa de aquisição de dados é a interface entre os sinais provenientes dos transdutores e o dispositivo de armazenamento desses dados (microcomputador). É o meio que realiza a conversão do sinal analógico para o digital, enviando esse último ao computador. Existem diversas formas de comunicação com o microcomputador, que vão desde conexões sem fio (*Wireless*) e Ethernet, a PCI (*Peripheral Component Interconnect*) e Serial. No presente caso, foi utilizado um dispositivo da *National Instruments* USB modelo 6218, como mostrado na figura 2.8. Este dispositivo tem a característica de ter trinta e duas entradas analógicas para o modo RSE (*Single-Ended*) ou quatro entradas para o modo Diferencial. O primeiro tem uma resolução de 16 bits, para a faixa de amplitude do sinal de entrada, captando no máximo a faixa de ± 10 V e no mínimo ± 1 V. Já o segundo tem resolução de 14 bits, para captar no máximo a faixa de ± 20 V e no mínimo ± 1 V. O dispositivo tem uma taxa de amostragem máxima de 250.000 amostras por segundo. (NI, 2009)



Figura 2.8 – Placa de aquisição de dados utilizada.

Os sinais de entrada da placa de aquisição de dados são originários de transdutores de tensão e transdutores de corrente, ligados nos terminais de saída do gerador elétrico. Transdutores e sensores apresentam sua própria interface entre o mundo real e o sistema de aquisição de dados, convertendo o fenômeno físico em sinais elétricos, os quais são

compatíveis para leitura por meio de *hardware* de condicionamento e/ou aquisição de sinais elétricos.

Os dispositivos eletrônicos utilizados foram:

- a) Transdutores de tensão modelo LV 25-P: têm a função de realizar medições de tensões CA, CC e pulsada, dentro da faixa de 10 a 500 V, e possuem isolamento galvânica entre o circuito primário (alta tensão) e o secundário (circuito eletrônico). A figura 2.9 ilustra o transdutor de tensão LV 25-P, fabricado pela LEM, e a figura 2.10 o diagrama de conexões desse dispositivo.

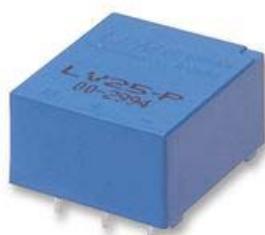


Figura 2.9 – Transdutor de tensão LV 25-P da LEM. (LEM, 2011)

Para operação adequada desse dispositivo, deve ser utilizado um resistor externo ao transdutor, denominado R_1 , na entrada +HT, limitando o valor de corrente nominal no circuito primário em até $10 \text{ mA}_{\text{rms}}$ (especificação do fabricante). Outro resistor externo, denominado R_M , deve ser inserido no circuito secundário, compreendido entre o ponto de coleta (ponto “M” na figura 2.10) e um potencial de referência (0 V), o qual limita a corrente nominal no circuito secundário em até $25 \text{ mA}_{\text{rms}}$ (especificação do fabricante). Nas medições cujo sinal de coleta desejado seja um sinal de tensão, o mesmo deve ser medido sobre os terminais do resistor R_M , onde se obtém um sinal analógico cuja forma de onda na saída do dispositivo é proporcional à forma de onda da tensão de entrada. Assim, a conexão ao sistema de aquisição de dados pode ser realizada. Deve-se efetuar um processamento numérico sobre esse sinal, a fim de se obter o valor real da grandeza medida, à qual corresponde a diferença de potencial entre os terminais +HT e –HT. Segundo o fabricante (LEM, 2011), a relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada, sem levar em conta erros oriundos do processo de medição, é obtida através de uma equação linear.

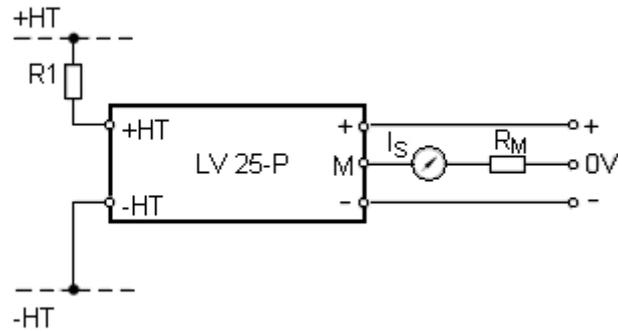


Figura 2.10 – Circuito do transdutor de tensão LV 25-P: +HT : polo positivo; -HT : polo negativo; terminal + : entrada de tensão entre +12 e +15 V; terminal M: medição; terminal - : entrada de tensão entre -12 e -15 V. (LEM, 2011)

- b) Transdutores de corrente modelo HAL 50-S: têm a função de realizar medições de corrente CA, CC e pulsada em até três vezes a corrente nominal no lado primário ($I_{\text{nominal}} = 50 \text{ A}$). Possuem isolamento galvânico entre o circuito primário (circuito de alta potência) e o circuito secundário (eletrônico). A figura 2.11 ilustra o transdutor de corrente HAL 50-S, fabricado pela LEM, e a figura 2.12 o diagrama de conexões.



Figura 2.11 – Transdutor de corrente HAL 50-S da LEM. (LEM, 2011)

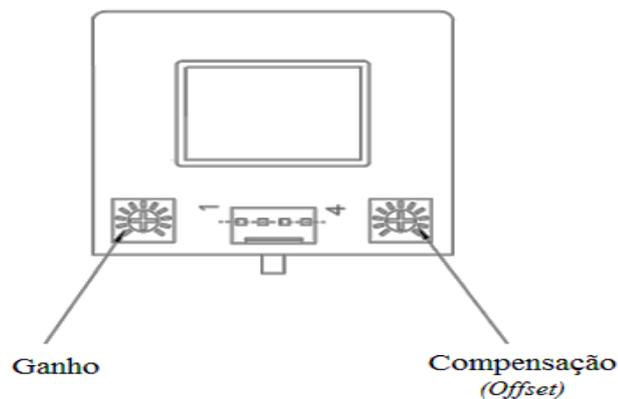


Figura 2.12 – Circuito do transdutor de corrente HAL 50-S: terminal 1: entrada de tensão em + 15V; terminal 2: entrada de tensão em - 15 V; terminal 3: saída; terminal 4. (LEM, 2011)

Para a operação desse dispositivo em conformidade com as recomendações do fabricante, devem-se ajustar adequadamente os valores de ganho da relação saída-entrada e do nível DC (*offset*) do sinal de saída (LEM, 2011). Observa-se que para pequenos ajustes no ganho a saída do transdutor de corrente varia muito pouco para uma variação considerável de corrente no circuito primário, facilitando a introdução de erros de medição. A saída do transdutor é um sinal de tensão analógico, cuja forma de onda é linearmente proporcional à forma de onda da corrente de entrada no circuito primário.

As figuras 2.13 e 2.14 apresentam as curvas que relacionam os valores de entrada e saída para os transdutores de tensão e corrente, respectivamente, utilizados na bancada de testes deste trabalho.

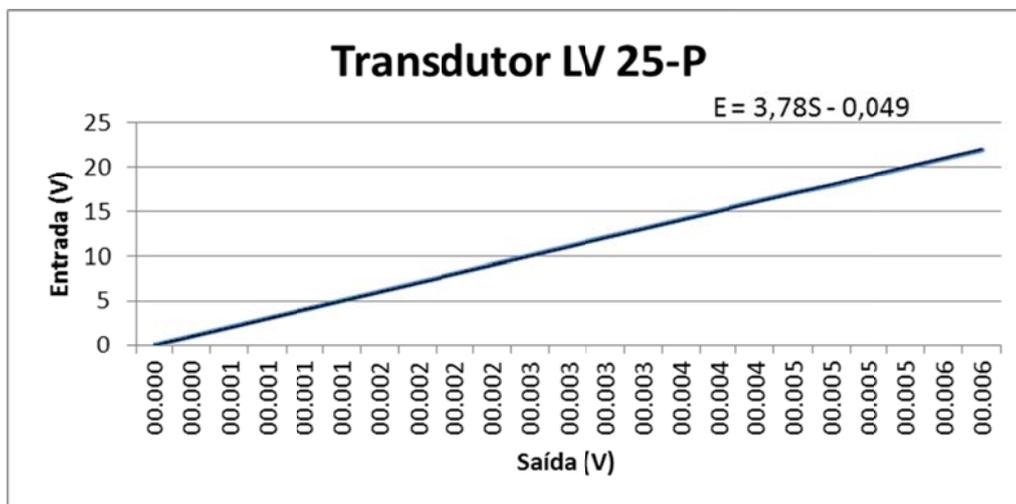


Figura 2.13 – Gráfico da relação entrada-saída para o transdutor de tensão.

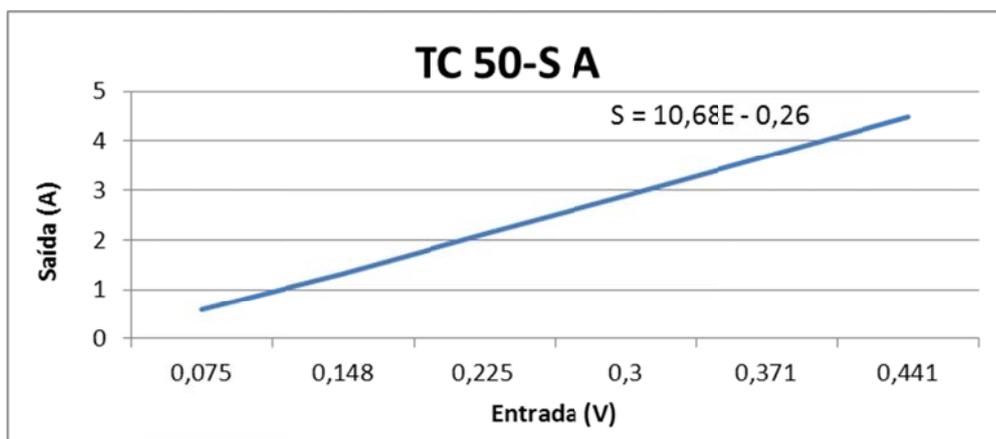


Figura 2.14 – Gráfico da relação entrada-saída para o transdutor de corrente.

- c) Sensor de rotação: com o propósito de medir a velocidade de rotação angular, é utilizado um sensor magnético (tipo *pick-up*), que fornece na saída um sinal de tensão alternada cuja frequência é proporcional à frequência da rotação angular do eixo em que se deseja medir, o qual é apresentado na figura 2.15. Esse tipo de sensor, que dispensa o uso de uma fonte para alimentação, funciona com base no princípio da indução eletromagnética e, por conta disso, é utilizado juntamente com uma roda dentada metálica. A figura 2.16 ilustra os parâmetros que devem ser utilizados para confecção da roda dentada, segundo DLG (2012).



Figura 2.15 – Sensor magnético tipo *pick-up* utilizado para medir a velocidade angular. (DLG, 2012)

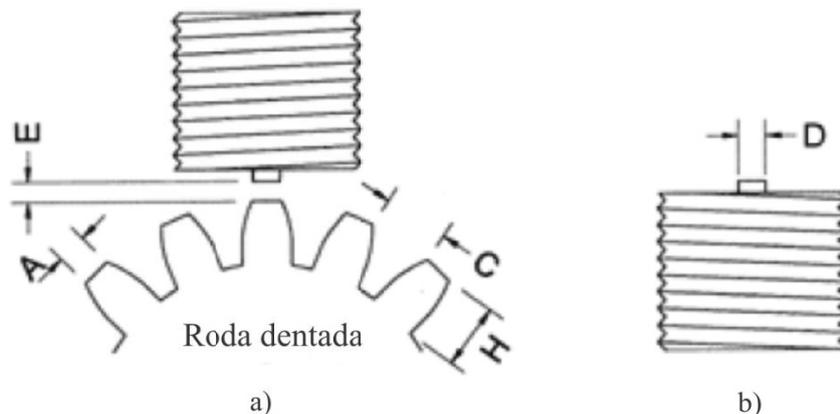


Figura 2.16 – a) Parâmetros para confecção da roda dentada utilizada na medição; b) Parte do sensor a partir da qual são especificados os parâmetros “A”, “C”, “E” e “H” (DLG, 2012).

Os parâmetros “A”, “B”, “C”, “E”, “H”, para que seja obtido um desempenho ótimo do sensor, devem satisfazer as seguintes relações,:

- $A > D$;
- $H > D$;
- $C > 3D$;
- $0,1 \text{ mm} < E < 0,5 \text{ mm}$.

Dessa forma, foi confeccionada uma roda dentada metálica, cujas dimensões estão mostradas na figura 2.17.

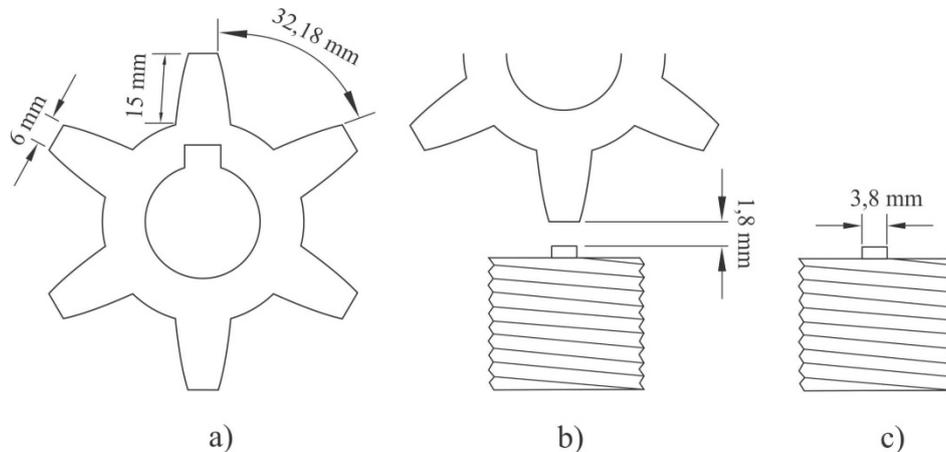


Figura 2.17 – a) Roda dentada confeccionada, com a indicação dos valores dos parâmetros “A”, “C” e “H”; b) Distância “E”; c) Tamanho “D”.

A relação entre a frequência angular medida e a frequência do sinal de tensão gerado na saída do dispositivo é dada pela equação 2.1 (DLG, 2012).

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad (2.1)$$

onde n é a rotação medida (em rpm), f é a frequência (em Hz) do sinal elétrico na saída do sensor e p é o número de dentes da engrenagem utilizada na medição.

2.3. Descrição do sistema de controle

Para simular a fonte de energia primária (vento) é utilizado um motor de indução trifásico com velocidade controlável, o qual é acoplado ao gerador elétrico. O controle da velocidade de rotação do motor é realizado por meio de um inversor de frequência, conectado via porta serial, a um microcomputador.

Os inversores de frequência são formados basicamente por uma ponte retificadora e capacitores de filtro, que alimentam um barramento DC, que por sua vez alimenta transistores IGBT's que são comandados através de uma lógica de controle, ligando e desligando-os de modo a alternarem o sentido da corrente que circula pelo motor. As figuras 2.18 e 2.19 ilustram, através de diagramas simplificados, os inversores de frequência para motores monofásicos e trifásicos.

O processo se desenvolve pela variação do fluxo magnético que é proporcional à variação da tensão e da frequência. De acordo com (WEG, 2006), é importante observar que para se manter o torque constante é preciso manter também o fluxo magnético constante. Desta forma, a tensão deve ser variada conjuntamente com a frequência. Essa variação é linear até a frequência nominal do motor. Acima da frequência nominal determina-se uma região chamada de “enfraquecimento do campo”, onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque também. A potência também mantém a mesma relação de variação com a tensão e a frequência.

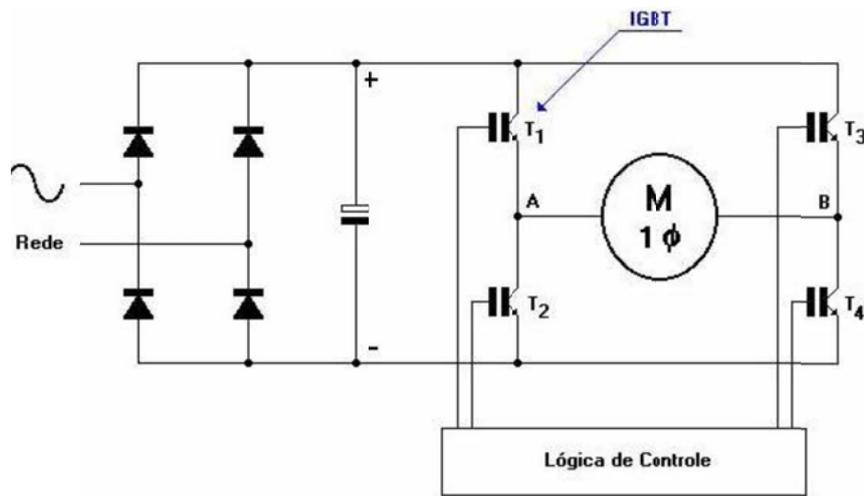


Figura 2.18 – Esquema simplificado de um inversor monofásico. (CAPELLI, 2002)

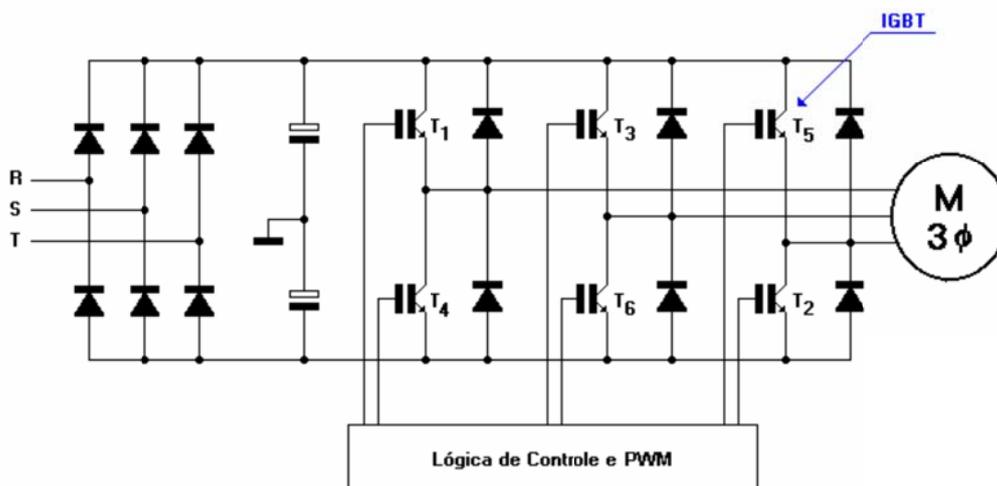


Figura 2.19 - Esquema simplificado de um inversor trifásico (CAPELLI, 2002).

Existem dois tipos de inversores de frequência que são caracterizados pelo seu princípio de controle, o escalar e o vetorial. Alguns inversores disponíveis hoje no mercado já

incorporam os dois tipos de controle em um mesmo equipamento, bastando para tanto a correta parametrização do equipamento quanto ao tipo desejado.

O inversor escalar opera tendo como referência uma curva V/F (tensão por frequência). Assim, para que o torque na carga se mantenha constante, essa relação tem que ser mantida na mesma proporção, ou seja, ao se variar a frequência de alimentação do motor, o inversor de frequência escalar deve variar a tensão de alimentação de tal forma que a relação entre ambos permaneça constante. Por ser uma função da relação de V/F, este tipo de inversor não oferece altos torques em baixas rotações, pois o torque é função direta da corrente de alimentação. Este tipo de inversor permite ainda a parametrização da curva V/F, sendo indicado para partidas suaves, operação acima da velocidade nominal do motor e operação com constantes reversões.

O inversor vetorial não possui uma curva parametrizada; na verdade essa curva varia de acordo com a solicitação de torque. Portanto, este tipo de inversor possui circuitos que variam a tensão e a frequência do motor, através do controle das correntes de magnetização (I_M) e do rotor (I_R), sendo indicado para torque elevado com baixa rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável.

A figura 2.20 apresenta um diagrama de blocos genérico de um inversor de frequência. A funcionalidade de cada bloco é comentada em seguida.

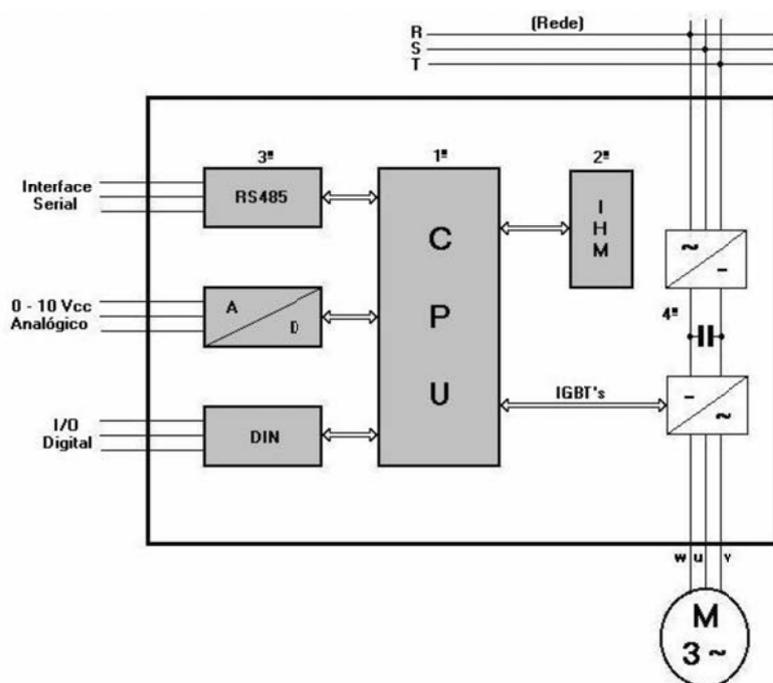


Figura 2.20 – Diagrama de blocos simplificado de um inversor de frequência. (CAPELLI, 2002)

- 1º bloco – CPU (UCP - unidade central de processamento). É formada por um microprocessador ou um Controlador Lógico Programável (CLP). Neste bloco todos os parâmetros e dados do sistema são armazenados, executando ainda funções vitais como: geração de pulsos de disparo dos IGBT's, que nada mais são que transistores que fazem a conexão do circuito, alterando o sentido da corrente que circula no motor.
- 2º bloco – IHM (interface homem máquina). Este dispositivo permite visualizar de que forma o inversor está parametrizado e, caso haja necessidade, permite a alteração dos seus parâmetros.
- 3º bloco – Interfaces. Permite a interação externa com o inversor de frequência, executando comandos que podem ser analógicos ou digitais. Normalmente, para controle da velocidade de rotação utiliza-se tensão analógica de comando (situada entre 0 e $10V_{cc}$), sendo essa velocidade proporcional ao valor da tensão empregada.
- 4º bloco – É constituído por um circuito retificador que alimenta, através de um barramento de corrente contínua (DC), o modulo que contém os IGBTs.

2.4. Programação desenvolvida para controle e aquisição de dados

Utilizando a plataforma *LabView*[®], versão 8.6, foi elaborada uma programação computacional para realizar a monitoração e o armazenamento das grandezas elétricas medidas no gerador, e também para o controle da velocidade do motor de indução.

Conforme mencionado, a conexão entre o inversor de frequência e o computador é realizada via porta serial (padrão RS-232). O objetivo básico da comunicação serial é efetuar a ligação física entre um ou mais inversores em uma rede de equipamentos configurada da forma exibida na figura 2.21.

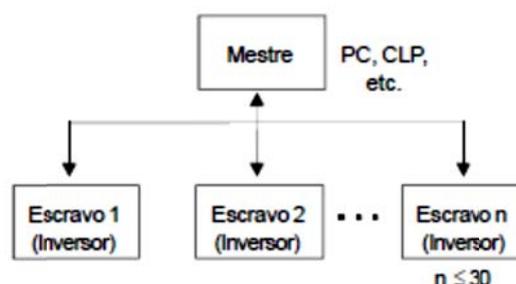


Figura 2.21–Diagrama de blocos de uma rede de inversores conectados a um dispositivo de controle (mestre). (WEG, 2006)

A comunicação entre o computador e o inversor dá-se por meio da utilização de um protocolo de comunicação (protocolo WEG). Um protocolo é, essencialmente, um conjunto de regras que governa a troca de dados entre um emissor e um receptor em uma rede de comunicações (PARK, 2003). No caso apresentado neste trabalho, o protocolo de comunicação é baseado no tipo pergunta/resposta, conforme normas ISO1745, ISO646, com troca de caracteres do tipo ASCII entre o inversor (escravo) e o mestre (computador). Ou seja, quando se deseja conhecer ou alterar valor de alguma variável contida na memória do inversor, o dispositivo denominado mestre envia uma solicitação de leitura ou escrita ao inversor e aguarda uma resposta. Essa resposta pode ser o valor da variável, uma confirmação de alteração de valor ou um aviso de erro na comunicação. O mestre pode ser um CLP, um microcomputador tipo PC, etc. Nesse protocolo, a taxa de transmissão máxima é de 38.400 bps (bits por segundo).

As mensagens trocadas entre o computador e o inversor são codificadas em conjuntos de bits estruturados da seguinte forma (WEG, 2006):

- 1 bit de início da transmissão (start bit);
- 8 bits de informação, que codificam caracteres de texto e caracteres de transmissão, tirados do código de 7 bits, conforme ISO 646 e complementadas para paridade par (oitavo bit);
- 1 bit de parada (stop bit).

Essa estrutura de transmissão está representada na figura 2.22. Após o bit de início, segue o bit menos significativo.

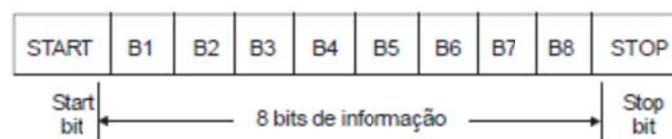


Figura 2.22 – Representação da estrutura de dados utilizados na comunicação do inversor. (WEG, 2006)

Essas estruturas de mensagens são denominadas de telegramas (WEG, 2006). Existem dois tipos de telegramas utilizados na comunicação:

- **Telegrama de leitura:** utilizado para consulta do conteúdo das variáveis do inversor;

- **Telegrama de escrita:** utilizados para alterar o conteúdo das variáveis ou enviar comandos para o inversor.

O telegrama de leitura permite que o mestre receba do inversor o conteúdo correspondente ao código da solicitação. No telegrama de resposta o inversor transmite os dados solicitados pelo mestre e este termina a transmissão enviando o caractere correspondente ao fim da transmissão (EOT), conforme codificação ASCII (tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Codificação ASCII para utilização em protocolos de comunicação. (WEG, 2006)

ASCII		
Código	Decimal	Hexadecimal
0	48	30
1	49	31
2	50	32
3	51	33
4	52	34
5	53	35
6	54	36
7	55	37
8	56	38
9	57	39
=	61	3D
STX	02	02
ETX	03	03
EOT	04	04
ENQ	05	05
ACK	06	06
NAK	21	15

No telegrama de escrita, os dados são enviados para as variáveis do inversor. O inversor irá responder indicando se os dados foram aceitos ou não. A representação da estrutura dessa mensagem está ilustrada na figura 2.23.

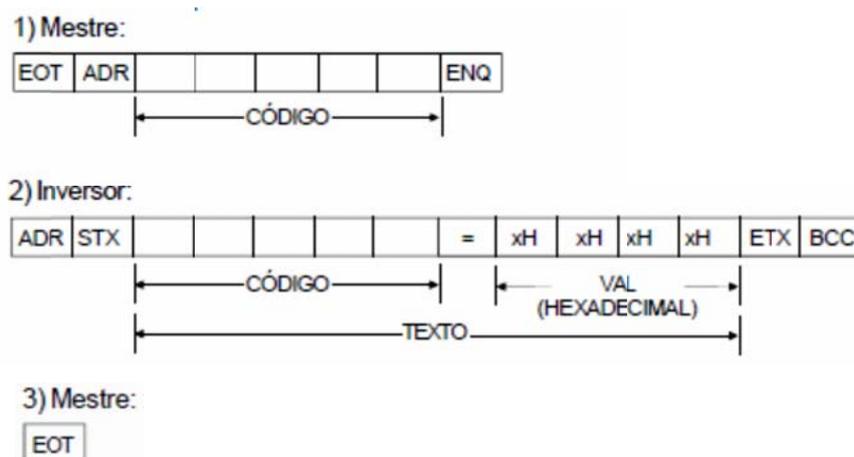


Figura 2.23 – Estrutura de codificação das mensagens, para uma solicitação de leitura em uma variável, trocadas entre microcomputador e inversor. (WEG, 2006)

Dessa forma, tem-se o seguinte formato para o telegrama de leitura (item 1 na figura 2.23):

EOT: caractere de controle que indica final da transmissão (End Of Transmission);

ADR: endereço do inversor na rede (ADRes);

CÓDIGO: endereço da variável de 5 dígitos codificados em ASCII;

ENQ: caractere de controle (solicitação - ENQuiry).

A descrição do campo código está expressa na figura 2.24.

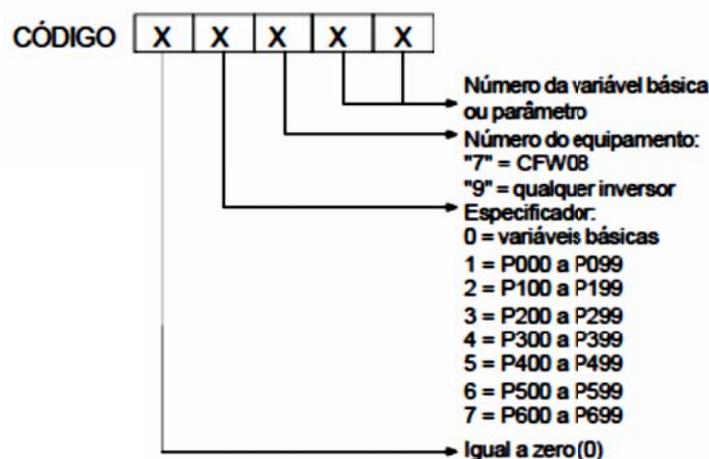


Figura 2.24 – Descrição do campo CÓDIGO nos telegramas de leitura e escrita. (WEG, 2006)

Para o telegrama de resposta do inversor, a codificação é a seguinte (item 2):

ADR: 1 caractere - endereço do inversor;

STX: caractere de controle - Start of TeXt;

TEXTO: consiste em:

- **CÓDIGO:** endereço da variável;
- “ = “: caractere da separação;
- **VAL:** valor da variável, expresso em 4 dígitos hexadecimais;
- **ETX:** caractere de controle(End of Text);
- **BCC:** Byte de CheCksum (operação de OU exclusivo de todos os bytes entre STX (excluído) e ETX(incluído)).

As siglas dos caracteres referentes à solicitação de escrita pelo inversor são os mesmos da solicitação de leitura, as quais já foram anteriormente descritas. A resposta do inversor consiste no seguinte:

- Aceitação da solicitação de escrita:
 - **ADR:** endereço do inversor;
 - **ACK:** caractere de controle (ACKnowledge).
- Não aceitação da solicitação de escrita:
 - **ADR:** endereço do inversor;
 - **NAK:** caractere de controle (NotACKnowledge). Isso significa que os dados enviados não foram aceitos e a variável enviada permanece com seu valor inalterado.

Esses procedimentos de comunicação foram implementados no programa computacional, para alteração da variável velocidade (código 00704). Além do sistema de controle de velocidade, é realizada a monitoração dos parâmetros elétricos medidos a partir do sistema de aquisição de dados anteriormente descrito. A figura 2.25 ilustra a tela principal do programa e a figura 2.26 apresenta a tela de aquisição de dados e controle do inversor, destacando alguns parâmetros.

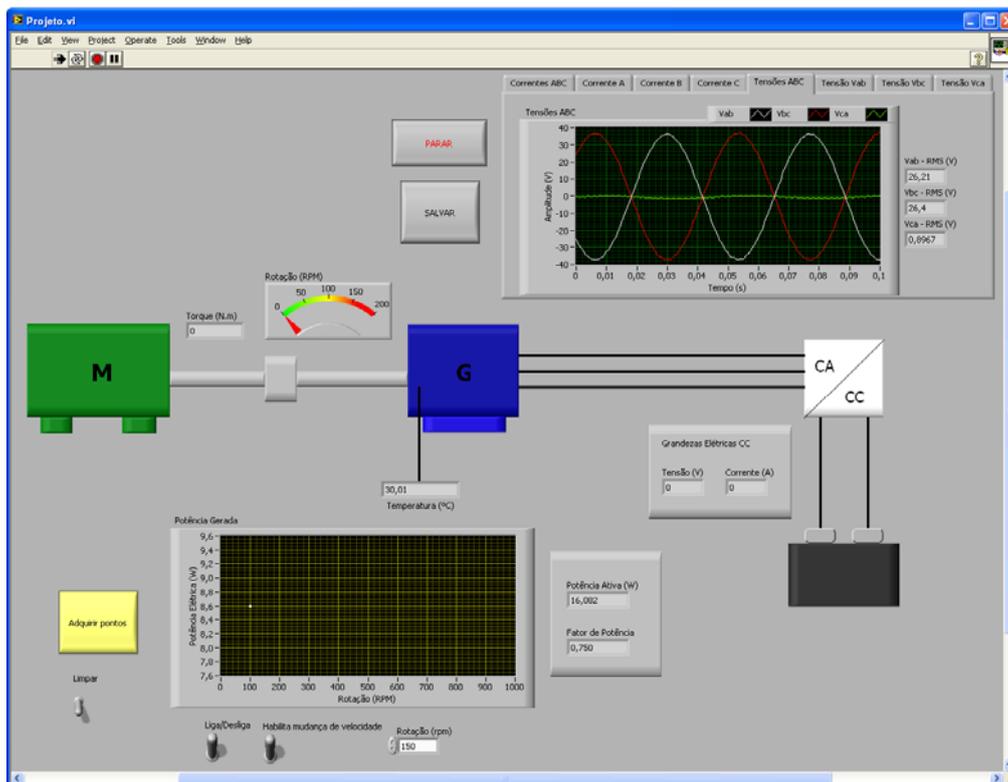


Figura 2.25 – Tela principal do programa.

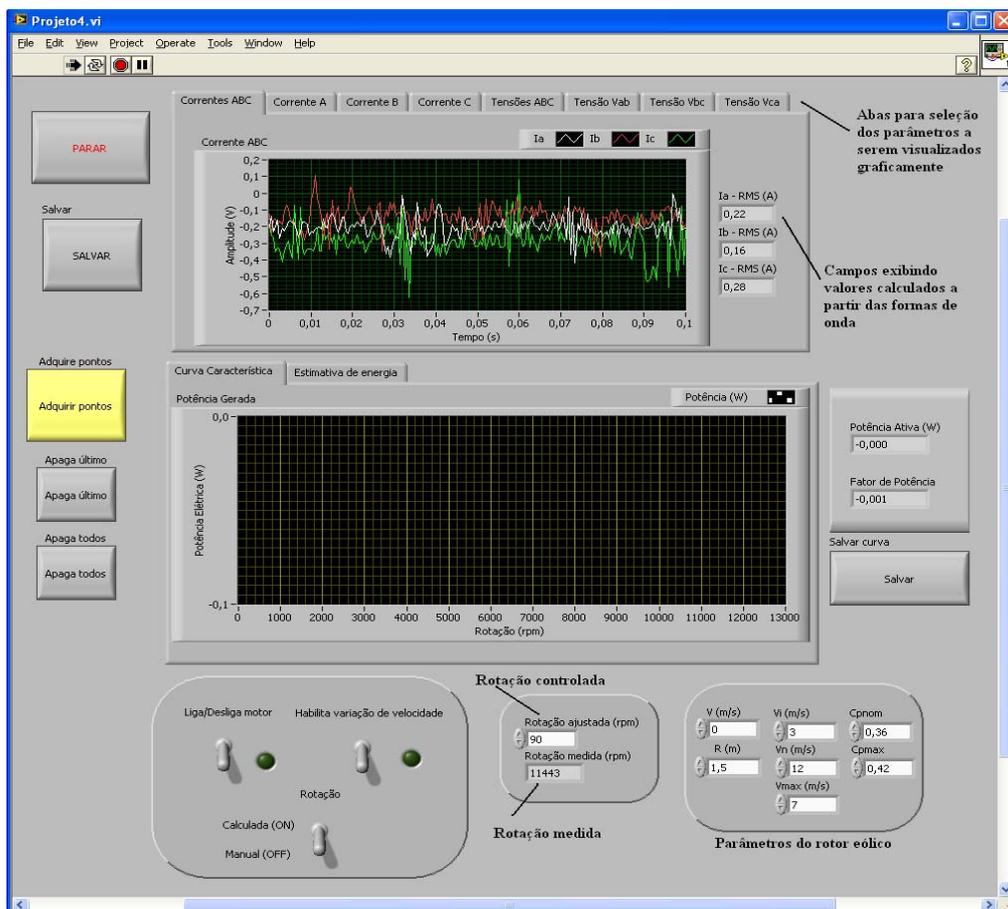


Figura 2.26 – Tela principal do programa de aquisição de dados e controle do inversor.

O programa possibilita ao usuário a visualização das formas de onda das grandezas monitoradas do gerador ensaiado. Essas grandezas consistem nas formas de onda das tensões e correntes nas três fases da máquina, além dos valores das frequências dessas grandezas. As figuras 2.27 e 2.28 destacam as janelas onde é possível visualizar as formas de onda das tensões e correntes nas fases da máquina sob teste, que correspondem aos gráficos localizados na parte superior da figura 2.25. Na figura 2.27 estão ilustradas as formas de onda das tensões nas fases de um gerador ensaiado. Na figura 2.28 é apresentada a forma de onda da corrente em uma das fases dessa máquina. Além da exibição na forma de gráficos, é possível observar o valor rms das grandezas exibidas. Nas abas correspondentes às medições das tensões e correntes por fase é possível visualizar, além do valor rms da grandeza, a frequência da forma de onda correspondente, como é possível observar na figura 2.28 que ilustra a forma de onda da corrente em uma fase da máquina.

A partir dos valores obtidos dos pontos amostrais são calculadas as potências ativa, reativa e aparente, bem como o fator de potência da máquina.

Além disso, é possível que o usuário armazene em arquivo os pontos amostrais correspondentes a essas formas de onda. A extensão do arquivo pode ser definida pelo usuário, ou pode ser utilizada a extensão padrão .xls (planilha do Microsoft Excel).

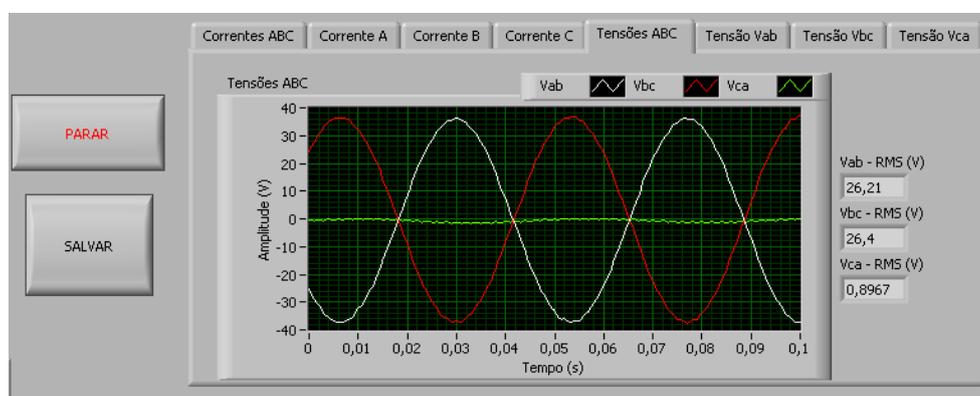


Figura 2.27 – Janela exibindo as formas de onda das tensões nas fases de uma máquina ensaiada.

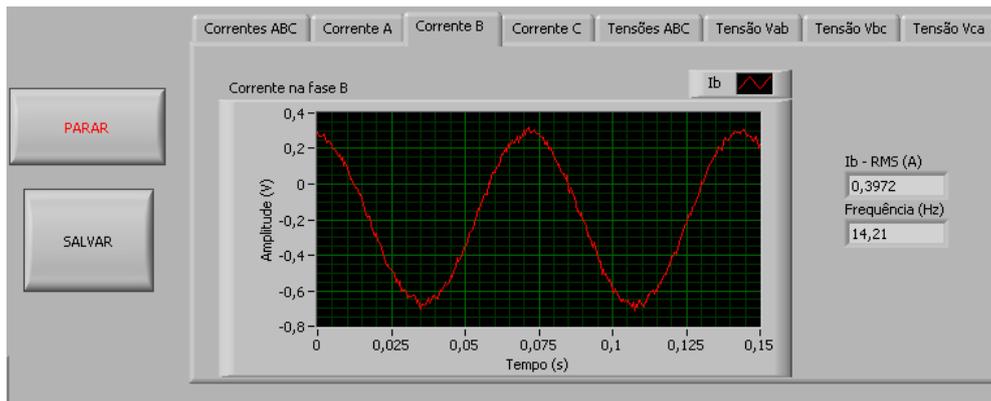


Figura 2.28 – Janela exibindo a forma de onda da corrente em uma das fases de uma máquina ensaiada.

Além disso, o programa permite também que o usuário efetue diretamente a alteração dos valores da velocidade angular (ω), dada em rotações por minuto (rpm) que é fornecida pelo motor de indução ao gerador ensaiado. Essas velocidades são, então, relacionadas com os valores da rotação angular e fornecidas ao sistema de controle (inversor de frequência), o qual varia a velocidade angular fornecida ao gerador.

Existem diferentes formas de se obter o valor da rotação angular a partir dos valores de velocidade de vento. Uma maneira é através da modelagem do acoplamento rotor eólico-gerador elétrico. Essa abordagem utiliza diversos parâmetros do rotor e do gerador, conforme o conjunto de equações a seguir. A figura 2.29 ilustra as variáveis de uma turbina eólica envolvidas nessa modelagem.

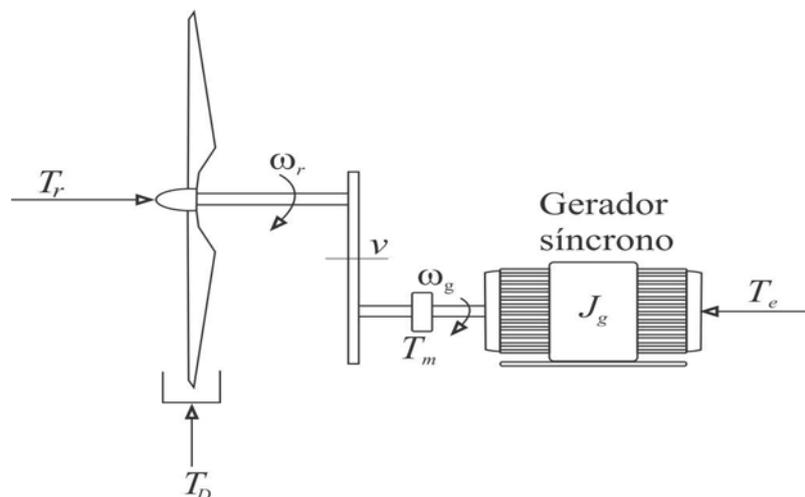


Figura 2.29 – Ilustração do acoplamento rotor-gerador.

A equação do balanço do torque, que relaciona o torque resultante com as perdas existentes no sistema é dada por: (CAMBLONG et al., 2004)

$$J_r \frac{d\omega_r}{dt} = T_r - T_D - v_i T_m \quad (2.2)$$

onde ω_r é a velocidade de rotação angular; J_r é o momento de inércia resultante do rotor; T_r é o torque do rotor; T_D é o torque devido ao atrito existente no sistema; T_m é o torque de reação do gerador elétrico, resultante da conexão a uma carga; e v_i é a razão de transmissão entre o eixo do rotor eólico e o gerador elétrico (razão entre as velocidades angulares do rotor e do gerador, caso seja considerado que o acoplamento entre os eixos é feito via caixa de multiplicação de velocidades).

Os termos T_r , T_D e T_m da equação 2.2 são calculados da seguinte forma.

O torque do rotor, ocasionado pelo vento incidente, é dado por: (STEINBUCH, 1989)

$$T_r = \frac{P_r}{\omega_r} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi R^2 V^3}{\omega_r} C_p(\lambda, \beta) \quad (2.3)$$

onde R é o raio do rotor eólico; V é a velocidade do vento na altura do eixo do rotor; ω_r é a velocidade de rotação; e C_p é o coeficiente de potência, que é o parâmetro que relaciona a potência disponível no vento com a potência mecânica obtida no eixo do rotor. Esse parâmetro é função de λ , também denominado de TSR (*Tip-Speed Ratio*), que é definido como sendo a razão entre a velocidade tangencial na ponta da pá de um aerogerador pela velocidade de vento incidente, e de β , que é o ângulo de passo (ângulo formado entre a linha de corda e o plano do rotor). O cálculo de λ é dado por:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (2.4)$$

Existem diversas aproximações para o cálculo do coeficiente de potência ($C_p(\lambda, \beta)$), apresentado na equação 2.3. Uma formulação, utilizando o método BEM clássico é dada por (MANWELL, 2009):

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a)\lambda_r^3 d\lambda_r \quad (2.5)$$

onde a' é dado por:

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)} \quad (2.6)$$

$$\lambda_r = r\lambda = r \frac{\omega R}{V} \quad (2.7)$$

As variáveis a e a' correspondem aos fatores de indução axial e angular, respectivamente. Uma vantagem no uso do método BEM é a possibilidade de se efetuar uma análise aerodinâmica ampla. No caso de aerogeradores, esse método é utilizado no projeto das pás, na análise do perfil aerodinâmico utilizado na confecção da mesma. O método permite avaliar o desempenho aerodinâmico com base nos valores calculados do coeficiente de potência e do fator de indução.

O torque T_D pode ser dado por:

$$T_D = C_1 + \frac{C_2}{\omega_r} + C_3 \omega_r \quad (2.7)$$

onde C_1 , C_2 e C_3 são constantes apropriadas, que representam as perdas devido ao atrito das partes mecânicas do rotor. Essa formulação para o cálculo do torque foi apresentada por Steinbuch (1989), e utilizada por Bao e Ye (2001) e por Chen (2009). Todos esses autores, porém, omitem a maneira como são obtidos os valores atribuídos às constantes mencionadas.

Por fim, o torque eletromagnético T_m desenvolvido pelo gerador quando a este é conectada uma carga é expresso por: (FITZGERALD, 2003)

$$T_m = \frac{3}{2} \left(\frac{N^\circ \text{ pólos}}{2} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (2.8)$$

A equação 2.8 expressa o torque eletromagnético para uma máquina síncrona que, conforme mencionado anteriormente, constitui-se na configuração mais utilizada em aerogeradores de pequeno porte atualmente. As variáveis λ e i referem-se ao fluxo magnético concatenado e à corrente elétrica que circula pelos enrolamentos da máquina, respectivamente. Os subíndices d e q indicam que as grandezas são relativas aos eixos direto e em quadratura, respectivamente.

Relacionando as equações 2.3, 2.7 e 2.8 com a equação 2.2, e explicitando a derivada $d\omega_r/dt$, obtém-se:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_r} \left[\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) - \left(C_1 + \frac{C_2}{\omega_r} + C_3 \omega_r \right) - \frac{3}{2} \left(\frac{N^\circ \text{pólos}}{2} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \right] \quad (2.9)$$

Em regime estacionário, não há variação temporal da velocidade angular. Portanto, o termo $d\omega_r/dt$ na equação 2.9 é igual a zero, o que conduz a:

$$\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) - \left(C_1 + \frac{C_2}{\omega_r} + C_3 \omega_r \right) - \frac{3}{2} \left(\frac{N^\circ \text{pólos}}{2} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = 0 \quad (2.10)$$

A equação 2.10 pode ser solucionada através de métodos numéricos para a obtenção do valor de ω_r . A dificuldade no uso dessa modelagem, entretanto, decorre no fato de que os valores numéricos atribuídos às constantes C_1 , C_2 e C_3 são de difícil obtenção. Não foi fornecido, nas referências consultadas, um procedimento para se estimar valores para esses parâmetros. Além disso, essa expressão possui uma limitação em virtude da singularidade existente para o valor de ω_r igual a zero. A expressão para o torque T_D considera apenas o torque resistente, que surge em função do movimento do rotor eólico. Assim, em decorrência desses fatos, não foi utilizada essa modelagem para estimativa do valor da rotação a partir dos valores de velocidade de vento. A abordagem utilizada neste trabalho é descrita a seguir.

O valor do Coeficiente de Potência (C_p) é associado aos valores de velocidade de vento, conforme a formulação apresentada por (Malinga *et al*, 2003), de acordo com as equações 2.11a e 2.11b:

$$C_p = C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{V_m}{V} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{V_m}{V} - 1 \right)^3 \right]; \quad V_c \leq V \leq V_n \quad (2.11a)$$

$$C_p = C_{pn} \left(\frac{V_n}{V} \right)^3; \quad V_n \leq V \leq V_f \quad (2.11b)$$

Este método de aproximação do coeficiente de potência requer o conhecimento da velocidade de partida do aerogerador (V_c), do coeficiente de potência máximo atingido pela máquina (C_{pm}); do coeficiente de potência nominal (C_{pn}); do valor de velocidade de vento

nominal (V_n) com o qual o gerador vai operar; e a velocidade de vento na qual ocorre o valor máximo do coeficiente de potência (V_m). A velocidade V_f corresponde à velocidade limite que a máquina pode suportar. As constantes F e G presentes na equação 2.11a podem ser calculadas através das condições de contorno, nas quais o valor do coeficiente C_p é igual a zero, para a velocidade V igual à velocidade de partida (V_c), e assume o valor nominal (C_{pn}) para V igual ao valor da velocidade nominal.

Aplicando essas condições e fazendo-se os algebrismos adequados, obtém-se os seguintes valores para F e G :

$$F = \frac{1}{K_1} - \frac{K_2}{K_1} G \quad (2.12)$$

$$G = \frac{BK_1 - K_3}{K_1K_4 - K_2K_3} \quad (2.13)$$

onde as constantes B , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 possuem os seguintes valores:

$$B = 1 - \frac{C_{pn}}{C_{pm}} \quad (2.14)$$

$$K_1 = \left(\frac{V_m}{V_c} - 1 \right)^2 \quad (2.15)$$

$$K_2 = \left(\frac{V_m}{V_c} - 1 \right)^3 \quad (2.16)$$

$$K_3 = \left(\frac{V_m}{V_n} - 1 \right)^2 \quad (2.17)$$

$$K_4 = \left(\frac{V_m}{V_n} - 1 \right)^3 \quad (2.18)$$

Com o cálculo do C_p efetuado conforme descrito, relaciona-se esse parâmetro com a velocidade angular (ω). Essa relação é feita através do uso de outra função matemática para o cálculo do C_p . O valor do C_p calculado pelas equações 2.11a e 2.11b é inserido em outra equação e, a partir daí, é obtido o valor do parâmetro λ (TSR). Existem diversas funções que relacionam o coeficiente de potência com o ângulo de passo das pás (β) e com a *tip-speed-*

ratio (λ), que é a relação entre a velocidade linear na ponta das pás e a velocidade de vento. A equação utilizada para o C_p neste trabalho foi apresentada por (SLOOTWEG, 2003), o qual mostrou que é possível fazer uma boa aproximação, para a maioria das turbinas eólicas, usando as seguintes relações:

$$C_p = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0,58\beta - 0,002\beta^{2,14} - 13,2 \right) e^{-18,4/\lambda_i} \quad (2.19)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0,002\beta} - \frac{0,003}{\beta^3 + 1}} \quad (2.20)$$

Por definição, a *tip-speed-ratio* (λ) relaciona-se com a velocidade angular por meio da equação 2.4 (SPERA, 2006).

Dessa forma, é necessária a obtenção da função inversa das equações 2.19 e 2.20, de tal maneira que o valor de λ passe a ser uma função de C_p , haja vista que, com C_p devidamente determinado por meio das equações 2.11a e 2.11b, necessita-se apenas do valor de λ , para que a rotação angular (ω) possa ser obtida por meio de 2.12. Ou seja, a abordagem utilizada calibra o modelo proposto por Sloodweg, (2003) a partir dos valores obtidos com o modelo de apresentado por Malinga *et al.*, (2003), para a obtenção do valor da rotação ω .

Para a obtenção da função inversa da equação 2.19, utilizou-se o recurso de linguagem simbólica existente no *software* Matlab[®], versão 2007. Esse recurso permite a obtenção de uma expressão analítica para funções inversas a partir da expressão de uma função fornecida.

Conforme previamente mencionado, o coeficiente de potência é função de β e λ . A fim de simplificar a expressão calculada, considera-se que aerogeradores de pequeno porte são projetados com um valor fixo do ângulo de passo para operação ótima, a qual, segundo (RISØ, 2002), é obtida quando o ângulo de passo assume o valor constante e igual a zero. Além disso, segundo (SLOOTWEG, 2003), o valor de β é nulo, para valores de velocidade de vento abaixo da velocidade nominal, e aumenta regularmente à medida que a velocidade de vento aumenta. As expressões obtidas, então, são dadas por meio das equações 2.21 e 2.22:

$$\lambda_i = \frac{-69460}{3775W\left[-\frac{1840}{11023}C_p e^{1,6084}\right] - 6072} \quad (2.21)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_i}{1 + 0,003\lambda_i} \quad (2.22)$$

A função $W(x)$ presente no denominador da equação 2.21, representa a função W de Lambert. Essa função corresponde à função inversa da equação 2.23:

$$y = xe^x \quad (2.23)$$

Não existe uma expressão analítica para o cálculo de $W(x)$, sendo necessário o uso de métodos numéricos para obtenção dos seus valores. Para esse cálculo, tomou-se por base o trabalho de CORLESS *et al* (1996), o qual comparou diferentes métodos numéricos para o cálculo de $W(x)$, chegando à conclusão de que o método proposto pelo físico Edmond Halley fornece uma convergência mais rápida e precisa para os valores de W . Esse método é iterativo, da mesma forma que o método de Newton, e sua expressão é dada pela equação 2.24.

$$W_{j+1}(x) = \frac{W_j(x)e^{W_j(x)} - x}{e^{W_j(x)}(W_j(x) + 1) - \frac{(W_j(x) + 2)(W_j(x)e^{W_j(x)} - x)}{2W_j(x) + 2}} \quad (2.24)$$

De maneira semelhante ao método de Newton, esse método requer a definição de um valor inicial para $W(x)$. Neste trabalho, levando em consideração que a faixa de variação do coeficiente de potência (C_p), que serve de argumento para a função $W(x)$, está compreendida entre 0 e 0,59 (valor máximo de acordo com o limite de Betz, embora o limite superior desse intervalo esteja bem abaixo desse valor para pequenos aerogeradores comerciais), aproximadamente, adota-se como valor inicial de $W_o(x) = -0,25$. Esse valor corresponde, aproximadamente, ao valor médio do intervalo de variação do argumento da função $W(x)$, a fim de assegurar a convergência do método. O critério de parada considerado é o erro tolerado de 0,01.

As equações 2.11 a 2.24 estão implementadas no ambiente de programação LabView[®], o qual, conforme já mencionado, é utilizado para o desenvolvimento do sistema de controle e aquisição de dados. A relação entre a velocidade de vento e a rotação tem como objetivo o levantamento da curva de potência da máquina ensaiada (gerador elétrico), a qual relaciona a potência elétrica disponível com os valores de velocidade de vento, tendo em vista a aplicação como aerogerador. De posse dos pontos que constituem essa curva, é possível estimar a produção energética da máquina para o regime de ventos fornecido. Assim, pode-se analisar o comportamento do gerador diante do perfil de velocidades dado e fazer os devidos ajustes de projeto no aerogerador, de modo a otimizar seu desempenho.

CAPÍTULO 3

REALIZAÇÃO DE TESTES PARA VALIDAÇÃO DA BANCADA

A fim de validar o sistema de testes descrito neste trabalho, são apresentados no presente capítulo os resultados obtidos com ensaios realizados em dois geradores elétricos, com vistas a serem utilizados em aerogeradores. São descritos os procedimentos de ajuste e conexão dos equipamentos, bem como a parametrização do programa computacional desenvolvido. Também são apresentados os resultados dos parâmetros elétricos medidos na forma de gráficos, que representam as características dos geradores ensaiados (potência ativa, tensões e correntes trifásicas).

3.1. Procedimentos experimentais para ensaio em geradores elétricos

Para realizar o procedimento de ensaio, é necessário, antes de tudo, ajustar as posições do motor e do gerador, a fim de que não haja desalinhamentos do acoplamento entre o motor e o gerador, ou pelo menos que esses estejam dentro dos limites especificados pelo fabricante.

Esse ajuste pode ser feito através da estrutura metálica desenvolvida, a qual possibilita deslocamentos horizontal e vertical do motor e do gerador. As figuras 3.1 e 3.2 exibem as estruturas de sustentação do motor e do gerador, respectivamente, com destaque para os parafusos que possibilitam o deslocamento vertical de ambas as máquinas para realização dos ajustes no acoplamento entre o motor e o gerador.

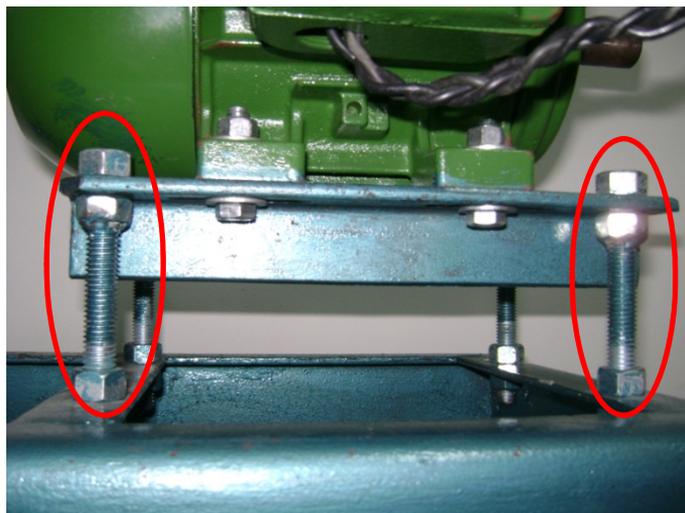


Figura 3.1 - Estrutura de sustentação do motor, onde é possível realizar o ajuste da altura para o acoplamento entre o motor e o gerador.



Figura 3.2 - Peça de sustentação do gerador com parafusos para deslocamento vertical.

Existem limitações quanto ao uso de geradores nesta estrutura, em virtude das dimensões da mesma e da potência fornecida pelo motor de indução trifásico. O motor utilizado fornece uma potência mecânica máxima de 2 CV (1,5 kW aproximadamente) no eixo e rotação máxima de 1.755 rpm. O inversor utilizado no controle opera com uma alimentação trifásica que vai de 200 V_{AC} a 240 V_{AC} e corrente máxima de saída de 17 A. Não é possível realizar testes que demandem uma potência maior, sem modificar a configuração do sistema de testes, ou seja, sem substituir o motor e, conseqüentemente, também o inversor de frequência e o acoplamento do conjunto motor-gerador. Outras configurações de motores (5, 10 e 15 CV) com os respectivos inversores e acoplamentos encontram-se disponíveis. Para realizar testes com essas configurações, contudo, é necessário realizar uma

reconfiguração do sistema, redimensionando a estrutura metálica e o acoplamento para os novos tamanhos.

Além dessas limitações, existe ainda a restrição quanto ao intervalo de variação da velocidade angular que pode ser conferida ao motor por meio do inversor. O limite inferior desse intervalo é de aproximadamente 90 rotações por minuto e o limite superior é estabelecido pela rotação nominal do motor (1.755 rpm), limitações essas que são decorrentes do modelo de inversor utilizado. É possível obter valores fora desse intervalo, caso seja utilizado um sistema de transmissão de velocidades.

Os resultados apresentados foram obtidos com testes efetuados apenas em geradores com potência nominal de 1 kW apenas.

A fim de se medir a potência fornecida, o gerador é conectado a uma carga. É utilizada uma carga resistiva com conexão trifásica, capaz de dissipar até 20 kW, e cujos ramos encontram-se ligados na configuração delta. Cada ramo possui uma resistência aproximada de $7,26 \Omega$, conforme ilustrado na figura 3.3.

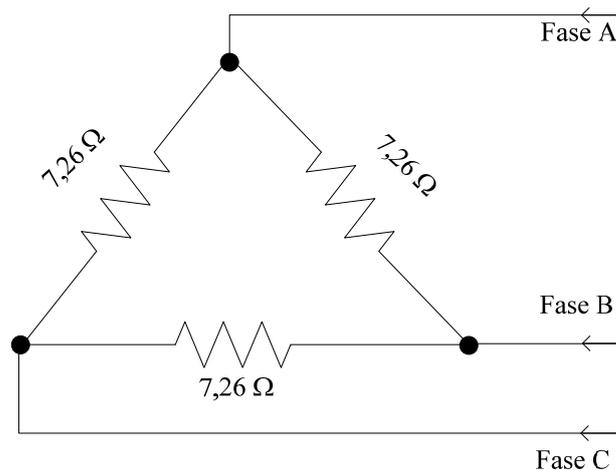


Figura 3.3 – Configuração da carga utilizada nos ensaios, com os valores das resistências dos ramos.

Após serem feitos os devidos ajustes mecânicos e conexões elétricas, é necessária a parametrização do programa computacional. No ensaio, a variação da velocidade angular do motor simula o comportamento de um rotor eólico acoplado ao gerador para uma dada velocidade de vento. Assim, para que seja simulado o comportamento da turbina eólica, é necessário fornecer alguns parâmetros aerodinâmicos do rotor que se deseja simular ao programa de controle. Esses parâmetros são: as estimativas dos valores dos coeficientes de potência máximo e nominal ($C_{p\text{máx}}$ e C_{pn}) do rotor a ser utilizado; o raio desse rotor (R); a velocidade de vento onde ocorre a partida da máquina (V_i); a velocidade de vento na qual a

máquina atinge sua rotação nominal (V_n), e a velocidade de vento onde ocorre o valor máximo do coeficiente de potência C_{pmax} , denominada de V_{max} . A figura 3.4 exibe parte da tela onde são inseridos os parâmetros do ensaio. Nesta figura estão destacados (em vermelho) os campos onde o usuário informa os parâmetros mencionados. Os valores numéricos atribuídos aos parâmetros aerodinâmicos (C_{pmax} , C_{pn} , V_i , V_n e V_{max}) utilizados nos ensaios foram obtidos através de consulta a um fabricante de aerogeradores de pequeno porte comerciais (ENERSUD, 2005).

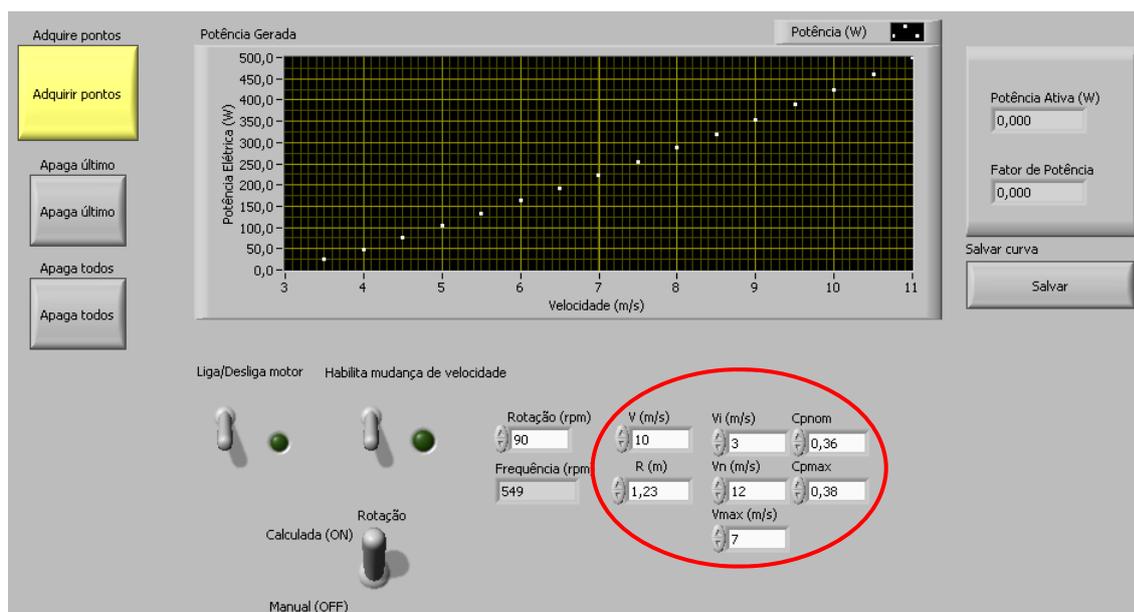
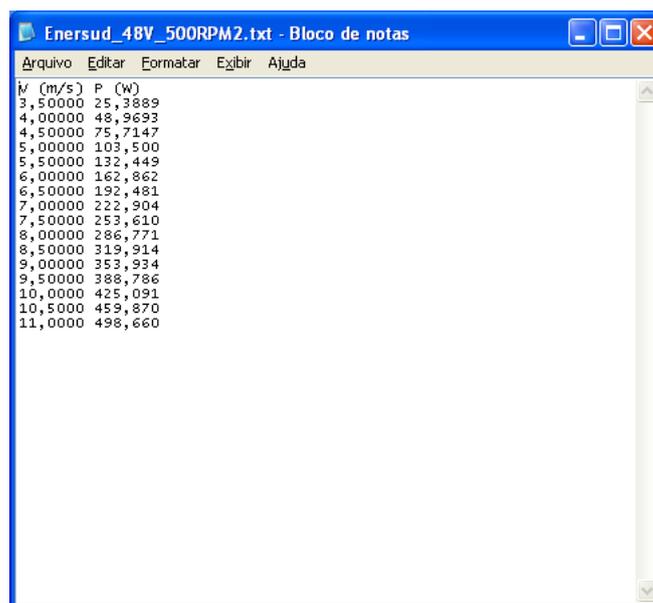


Figura 3.4 – Tela do programa de controle.

Fornecidos esses valores, a velocidade de vento pode ser variada dentro do intervalo em que se deseja ensaiar o gerador. Cada valor de velocidade corresponde a uma rotação específica, que é fornecida ao inversor de frequência, o qual controla o motor de indução que movimenta o gerador ensaiado. Os valores da potência elétrica ativa na saída do gerador são registrados juntamente com as velocidades de vento. Esses pontos, que compõem a curva de potência (potência ativa versus velocidade de vento) do gerador, são exibidos em um gráfico e podem ser armazenados em um arquivo texto, conforme ilustrado na figura 3.5.



The image shows a screenshot of a text editor window titled 'Enersud_48V_500RPM2.txt - Bloco de notas'. The window contains a table with two columns: 'v (m/s)' and 'P (W)'. The data points are as follows:

v (m/s)	P (W)
3,50000	25,3889
4,00000	48,9693
4,50000	75,7147
5,00000	103,500
5,50000	132,449
6,00000	162,862
6,50000	192,481
7,00000	222,904
7,50000	253,610
8,00000	286,771
8,50000	319,914
9,00000	353,934
9,50000	388,786
10,0000	425,091
10,5000	459,870
11,0000	498,660

Figura 3.5 - Arquivo texto contendo os dados registrados de potência ativa e velocidade de vento.

3.2. Resultados de ensaios realizados em geradores de fluxo axial

Foram efetuados ensaios com dois geradores elétricos de fluxo axial com ímãs permanentes. Um deles foi desenvolvido conforme um projeto de pesquisa, com vistas em uma aplicação em aerogeradores de pequeno porte, com um rotor adaptado a baixos valores de velocidade de vento. O outro é de fabricação comercial e está disponível no mercado nacional.

Os testes constituíram-se na aquisição das formas de onda das tensões e correntes e no levantamento das curvas de potência dos geradores. Primeiramente considerando os parâmetros de um rotor adaptado a baixas velocidades de vento e, posteriormente, um rotor de uso comercial, ambos utilizados em aerogeradores de pequeno porte.

As figuras 3.6 e 3.7 ilustram as formas de onda das tensões e das correntes nas três fases de um gerador ensaiado. Esse gerador foi desenvolvido em um projeto de pesquisa e desenvolvimento, cujas características construtivas encontram-se descritas no capítulo 1 (seção 1.3) do presente trabalho.

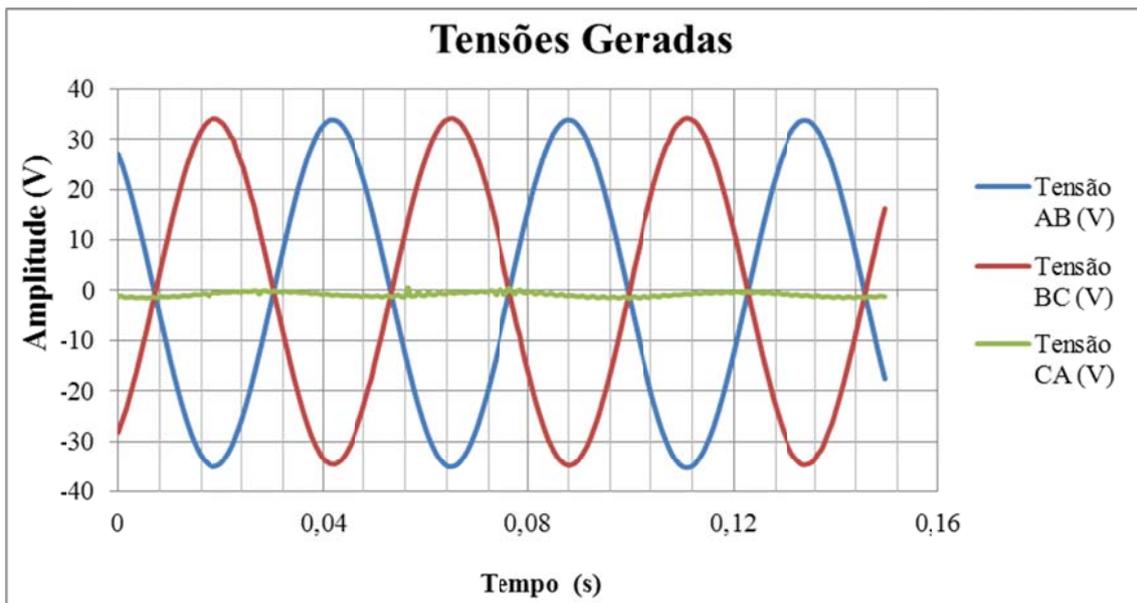


Figura 3.6 – Tensões geradas nas fases do equipamento em teste.

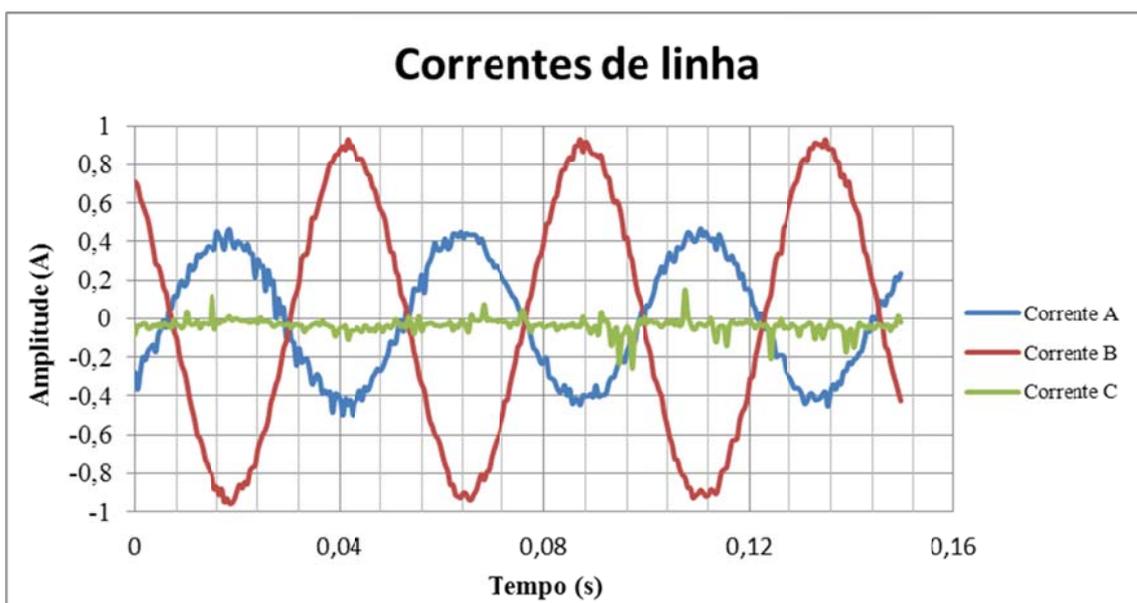


Figura 3.7 – Correntes de linha do gerador desenvolvido.

Através desse ensaio, puderam-se verificar efetivamente os valores das amplitudes e defasagens entre as formas de onda das tensões e correntes de saída. A rotação verificada para essas medições foi de 150 rpm. Constatou-se nesse gerador que, em virtude do ângulo de defasagem entre as formas de onda das tensões ser de 180° , a diferença de potencial entre duas fases estava assumindo valor nulo ao longo do tempo. Esse fato ocorreu em virtude da disposição dos enrolamentos em relação à excitação, via ímãs permanentes. Um resultado interessante que pode ser observado, contudo, foram os valores das amplitudes das tensões

geradas haja vista que esse equipamento é um protótipo desenvolvido no laboratório do GEDAE. Foi possível obter valores de tensões mais elevados quando comparados aos valores obtidos com um gerador comercial, quando submetido às mesmas condições de ensaio a que foi submetido o protótipo (mesmo valor de velocidade angular).

Os gráficos com as formas de onda das tensões e correntes nas três fases do gerador comercial estão apresentados nas figuras 3.8 e 3.9, respectivamente.

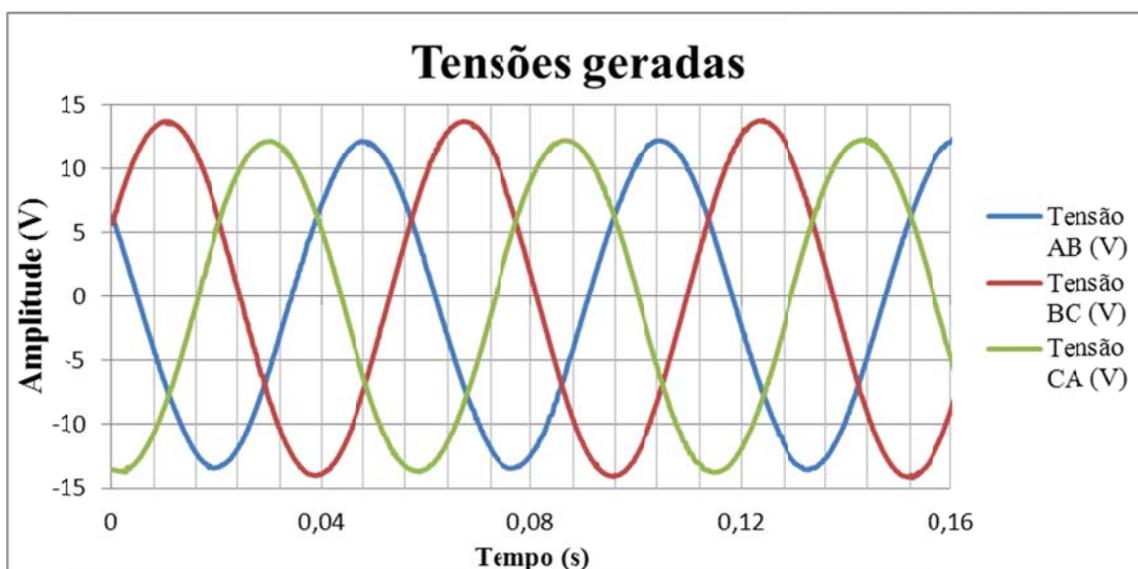


Figura 3.8 – Tensões geradas nas fases de um gerador comercial de 1 kW.

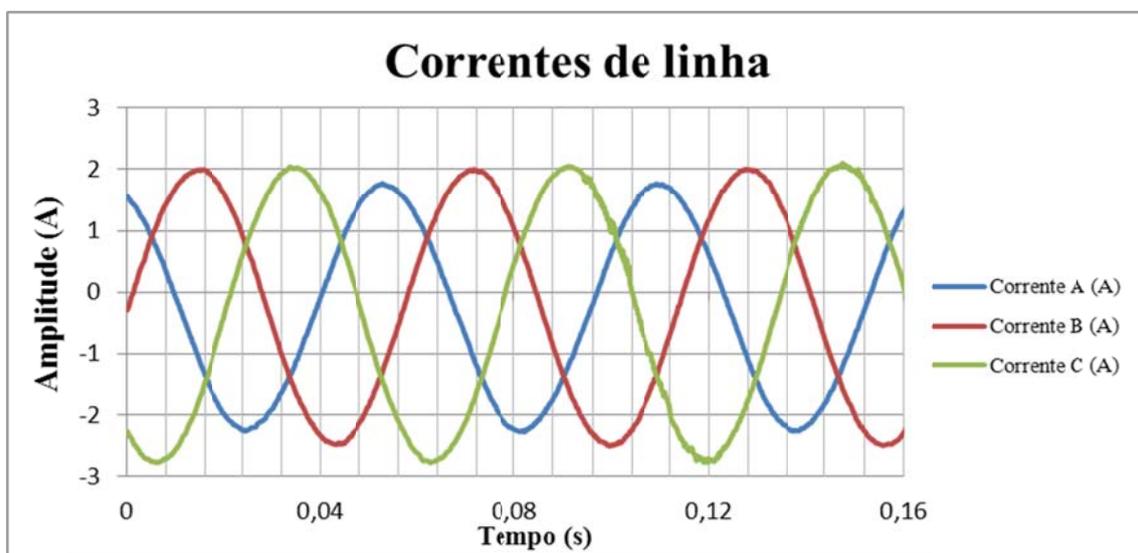


Figura 3.9 – Correntes de linha de um gerador de 1 kW.

Os gráficos evidenciam os resultados previamente comentados. Para o mesmo valor de rotação, os valores das amplitudes das tensões obtidas nas fases dessa máquina são inferiores àquelas obtidas no protótipo desenvolvido. Esse fato indica que, na aplicação como

aerogerador, o protótipo inicia a produção de eletricidade com menores valores de rotação, os quais correspondem a menores valores de velocidade de vento, cumprindo, assim, o objetivo para o qual foi projetado. Essa característica deve-se em razão da máquina desenvolvida possuir um maior número de polos (18 pares de ímãs permanentes) quando comparada à máquina comercial (14 pares de ímãs permanentes).

Além das formas de onda das tensões e correntes nas fases da máquina, foi levantada a curva de potência do gerador comercial, a qual está ilustrada na figura 3.10. Os parâmetros do rotor utilizado foram obtidos através do trabalho de Vaz (2010), o qual utiliza um rotor eólico de 1,2 m de raio, adaptado a baixas velocidades de vento, com vistas a uma utilização na Região Amazônica, onde as velocidades médias, a 30 metros de altura, encontram-se abaixo de 5 m/s.

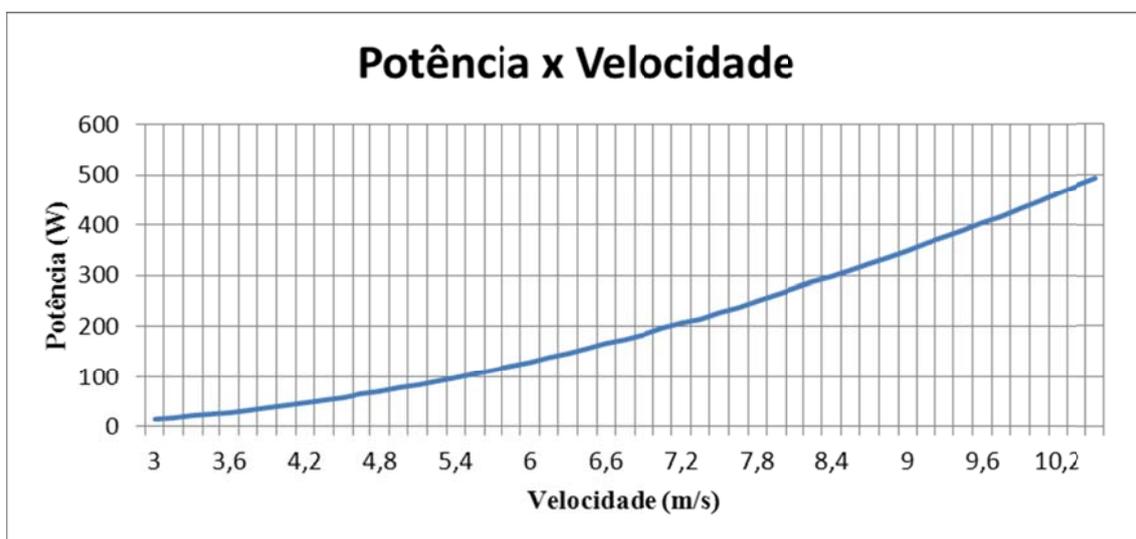


Figura 3.10 – Curva de potência do gerador com o rotor projetado por Vaz (2010).

Além da curva da potência em função da velocidade, foi obtida a curva da potência de saída em função da rotação, a qual está apresentada na figura 3.9. Os valores de rotação estão limitados em 600 rpm, em virtude de ter sido constatado que a máquina entrava em saturação para rotações mais elevadas, fato que pode ser observado em virtude da pouca variação dos valores da tensão na saída do gerador para rotações mais elevadas. A tensão elétrica entre fases atingida nessa rotação foi de 48 V, o que corresponde à tensão em operação nominal, segundo dados fornecidos pelo fabricante.

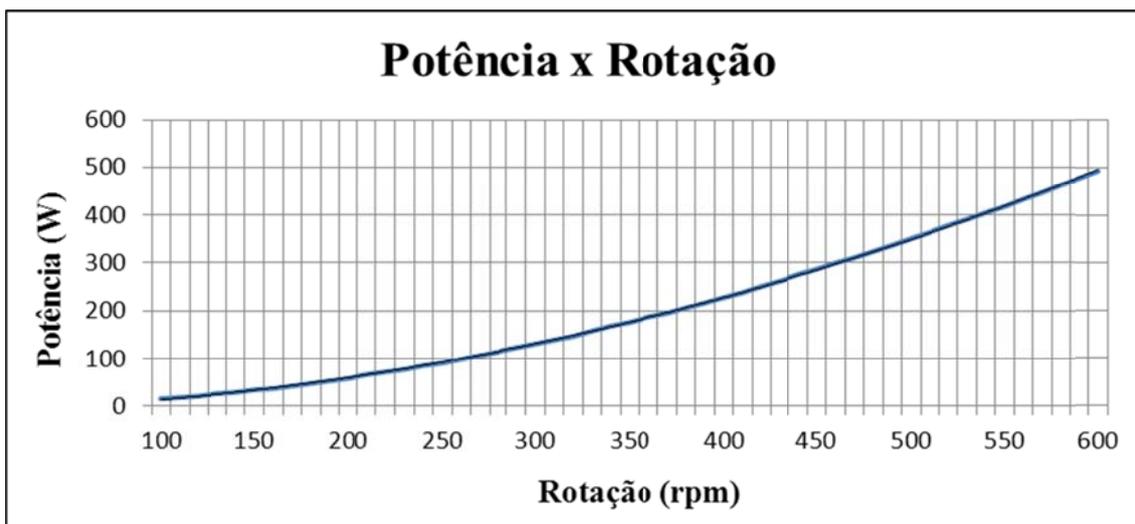


Figura 3.11 – Curva de potência versus rotação para um gerador elétrico, simulado com um rotor projetado por Vaz (2010).

Outro ensaio realizado com a bancada de testes desenvolvida foi utilizando os parâmetros aerodinâmicos de um rotor usado em aerogeradores comerciais, os quais foram obtidos por meio de consulta ao fabricante (ENERSUD, 2005). O resultado está expresso na figura 3.12.

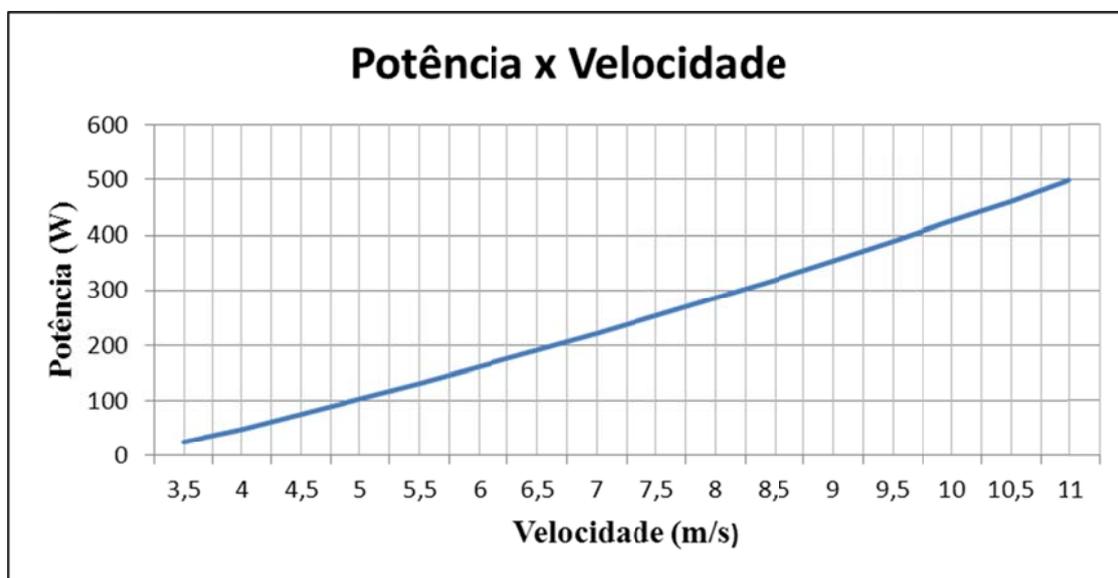


Figura 3.12 – Curva de potência do gerador comercial de 1 kW com rotor comercial.

Os pontos referentes as curvas de potência apresentadas nas figuras 3.10 e 3.12 estão organizados nas tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 – Pontos que compõem a curva de potência do gerador comercial com rotor desenvolvido por Vaz (2010).

Velocidade (m/s)	Potência (W)
3	15,22
3,5	25,35
4	42,81
4,5	58,97
5	84,24
5,5	106,08
6	130,16
6,5	156,66
7	195,93
7,5	227,62
8	261,91
8,5	311,42
9	350,06
9,5	390,21
10	447,49
10,5	492,21

Tabela 3.2 - Pontos que compõem a curva de potência do Gerador comercial com rotor comercial.

Velocidade (m/s)	Potência (W)
3,5	25,3889
4	48,9693
4,5	75,7147
5	103,5
5,5	132,449
6	162,862
6,5	192,481
7	222,904
7,5	253,61
8	286,771
8,5	319,914
9	353,934
9,5	388,786
10	425,091
10,5	459,87
11	498,66

Além dos ensaios mencionados, foram realizados testes com o gerador desenvolvido simulando o acoplamento com o rotor eólico comercial. A figura 3.13 apresenta a curva de potência obtida com esse equipamento, considerando o rotor comercial.

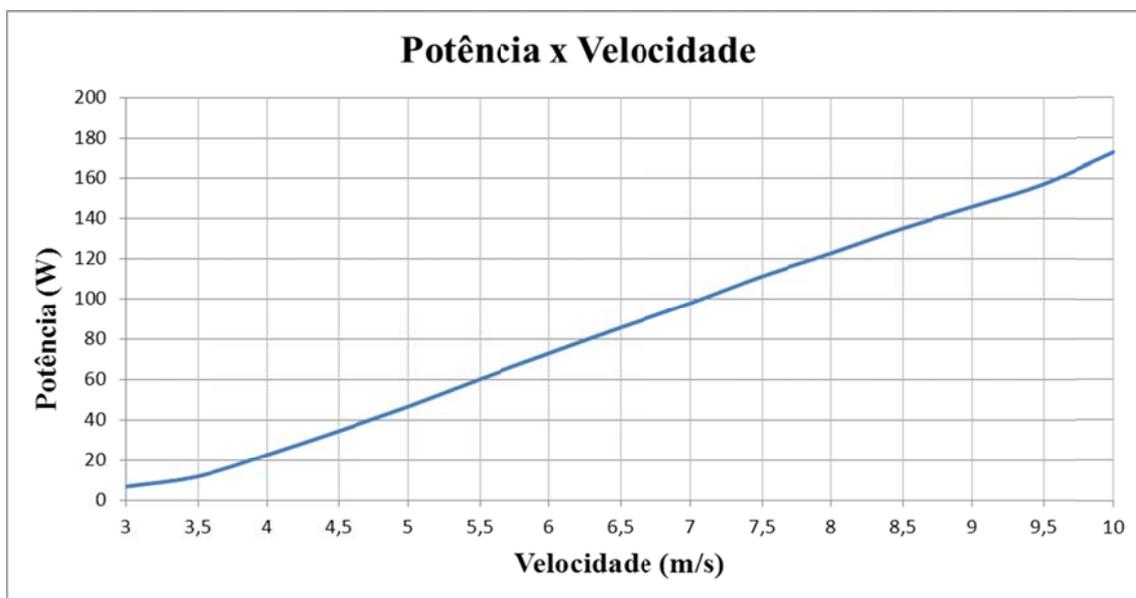


Figura 3.13 – Curva de potência do gerador desenvolvido com rotor comercial.

Os dados que compõem o gráfico da figura 3.13 estão contidos na tabela 3.3, apresentada a seguir.

Tabela 3.3 – Curva de potência do gerador desenvolvido com rotor comercial.

V (m/s)	P (W)
3	6,92
3,5	11,96
4	22,78
4,5	34,48
5	46,73
5,5	60,15
6	72,94
6,5	85,64
7	97,84
7,5	111,12
8	122,66
8,5	134,95
9	145,78
9,5	156,88
10	172,75

Além desse teste, foi realizado o ensaio considerando os parâmetros do rotor eólico desenvolvido por Vaz (2010).

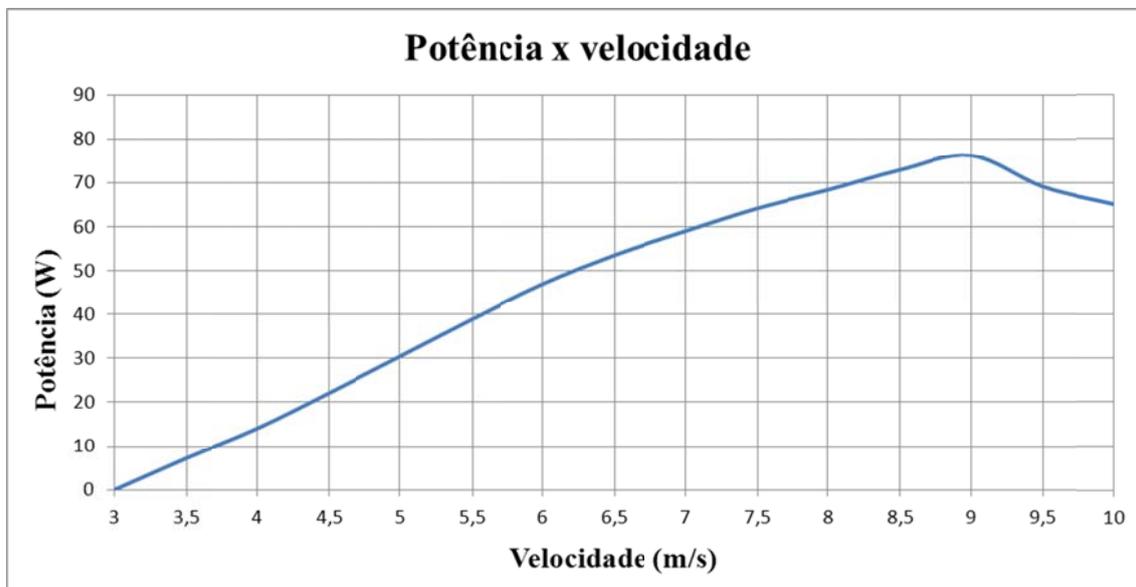


Figura 3.14 – Curva de potência obtida com gerador desenvolvido utilizando os parâmetros do rotor desenvolvido por Vaz (2010).

Tabela 3.4 - Curva de potência do gerador desenvolvido com rotor desenvolvido por Vaz (2010).

V (m/s)	P (W)
3	-
3,5	7,25
4	14,05
4,5	22,09
5	30,44
5,5	38,88
6	46,93
6,5	53,53
7	58,99
7,5	64,2
8	68,36
8,5	72,92
9	76,23
9,5	69,11
10	65,12

Em todos os testes a potência nominal não pôde ser verificada, em virtude de limitações da carga resistiva utilizada, que possui $7,26 \Omega$ em cada ramo para uma configuração trifásica em delta, conforme o esquema apresentado na figura 3.3. Esta carga possui a especificação nominal de 20 kW para uma tensão de alimentação de 220 V entre fases. Contudo, para a tensão de alimentação de 48 V (tensão nominal do gerador comercial) a potência máxima fica limitada em aproximadamente 500 W.

No caso do gerador desenvolvido, a potência ficou limitada em função das características construtivas do mesmo, que ainda se encontra em processo de melhoria. Devido à diferença angular entre as formas de onda das fases dessa máquina ser de aproximadamente 180 graus elétricos, a potência na saída ficou limitada a valores reduzidos, pois duas fases apenas possuíam valores instantâneos não nulos, conforme apresentado na figura 3.6.

As curvas de potência levantadas podem ser usadas no cálculo de estimativas de produção de energia, a fim de se realizar uma simulação do desempenho do equipamento

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de testes em bancada para geradores elétricos, aplicados em aerogeradores. O sistema é formado, basicamente, por dois subsistemas: um sistema de controle e um sistema de aquisição de dados. O sistema de controle permite a variação na velocidade angular de um motor de indução trifásico, que está acoplado ao eixo do gerador que se deseja testar, a fim de simular as condições de operação de uma turbina eólica. A velocidade de rotação do motor é modificada de acordo com valores de velocidade de vento informados pelo usuário. A relação desses valores com a velocidade de rotação angular depende dos parâmetros aerodinâmicos informados.

Quanto ao sistema de aquisição de dados, este possibilita obter os valores dos parâmetros elétricos de interesse, a fim de que possam ser feitas análises a respeito do comportamento da máquina ensaiada diante de valores de velocidade de vento fornecidos.

A abordagem utilizada no modelamento matemático para a obtenção dos valores de rotação angular a partir dos valores de velocidade de vento, embora simplificada, fornece uma aproximação que utiliza poucos parâmetros aerodinâmicos, quando comparada às abordagens tradicionais, que consideram o equacionamento entre o acoplamento rotor-gerador. Apesar dessa última ser a mais utilizada, os valores numéricos dos parâmetros utilizados são de difícil obtenção na literatura.

Embora tenham sido testados apenas geradores de fluxo axial, com ímãs permanentes, o sistema descrito também possibilita testes com outras topologias empregadas em aerogeradores de pequeno porte. A utilização nos testes apenas dessa topologia é justificada em função do seu uso ser atualmente predominante em pequenos aerogeradores comerciais.

Entende-se como um dos principais objetivos dos ensaios realizados, o conhecimento em laboratório das características de geração da máquina elétrica em teste, haja vista que nem sempre os fabricantes fornecem os parâmetros elétricos de interesse. Com esses dados, pode-se melhorar o projeto dessas máquinas e/ou orientar a escolha do equipamento a ser utilizado em aplicações de campo, a fim de se otimizar o seu desempenho.

Conhecendo-se o desempenho da máquina, pode-se realizar uma estimativa da geração de energia elétrica no seu local de instalação através do recurso eólico. Além disso, de posse das características da máquina testada, também é possível compará-las com os dados informados pelo fabricante, ou ainda, levantar parâmetros não fornecidos pelo mesmo.

Outra conclusão que pode ser obtida é que o sistema de testes com ensaios em bancada constitui uma alternativa mais simples, de menor custo e de mais fácil implementação em laboratório em relação aos sistemas para testes em aerogeradores que envolvem ensaios em túneis de vento. Embora esses últimos apresentem resultados de maior exatidão, sua construção demanda um projeto mais elaborado e, portanto, dispendioso, além da maior quantidade de equipamentos de medição utilizados e da necessidade de maior espaço físico para implementação.

Por fim, como sugestões para trabalhos futuros podem-se citar:

- Estudo e validação de outros modelos matemáticos que permitam relacionar, de forma mais realista, os valores de velocidade de vento com a rotação controlada;
- Medição de outros parâmetros elétricos do gerador (componentes harmônicos, distorção harmônica total, etc.) que possibilitem a realização de estudos sobre a qualidade da energia produzida nas máquinas ensaiadas;
- Utilização de outras topologias de geradores nos ensaios;
- Realização de ensaios com geradores de maior potência, a fim de validar o sistema para equipamentos de diversos portes;
- Realização de ensaios que permitam levantar outros parâmetros elétricos dos geradores, como o valor da reatância e das perdas por efeito Joule.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKHMATOV, V., NIELSEN, A. H., PEDERSEN, J. K. and NYMANN, O. Variable speed wind turbines with multipole synchronous permanent magnet generators. Part I: Modeling in dynamic simulation tools. *Wind Engineering*, Vol. 27, No 6, p. 531-48, 2003.
- AUTERSLITZ, H., “Data Acquisition Techniques Using PCs”, 2nd Ed., Academic Press, pp. 14-16, 2003.
- AWEA, American Wind Energy Association. Site: <<http://www.awea.org/>>, acessado em 15/01/2012.
- BLASQUES, L. C. M., “Estudo da Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2005.
- BRANCO, T. M. M., Projeto de Pesquisa: Processo CNPq N° 554878/2006-2 Edital MCT/CNPq/CTEnerg No 28/2006: Geração, Transmissão, Distribuição e Uso Final de Energia Elétrica. Coordenador: Prof. Dr. Tadeu da Mata Medeiros Branco Instituição: Universidade Federal do Pará/ Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas – UFPA/GEDAE. Vigência: 28/11/2007 a 28/02/2010.
- BUMBY, J.R.; MARTIN, R.; MUELLER, M. A.; SPOONER,E.; BROW, N. L. and CHALMERS, B. J. Electromagnetic Design of Axial Flux Permanent Magnet Machines. *IEEE Proc. Electr. Power Appl.* Vol. 151, N° 2, March 2004, p. 151-160, 2004.
- CAPELLI, A. Inversores de Frequência. *Revista Mecatrônica Atual*, N° 2, fevereiro de 2002, pp. 7-15.
- CORLESS, R. M.; GONNET, G. H.; HARE, D. E. G.; JEFFREY, D. J.; KNUTH, D. E. On the Lambert W Function. *Advances in Computation Mathematics*, vol. 5, pp. 329-359, 1996.

- ENERSUD. Nota Técnica 120201. “Curvas características de turbinas eólicas”, 2005.
- FITZGERALD, A. E., JUNIOR, C., K., UMANS, S. D. Máquinas elétricas. 6ª edição, pp 667, 2003.
- FRADE, L. C. S. e PINHO, J. T. “Levantamento, Tratamento e Análise de Dados de Velocidade e Direção do Vento no Litoral do Estado do Pará”, Relatório Técnico, GEDAE/ELETRONORTE, UFPA, 2000.
- GRAUERS, A. Generators for Gearless Wind Energy Converters. Proc. of European Union Wind Energy Conference and Exhibition, Göteborg, Sweden, pp. 418-21, May, 1996.
- LAMPOLA, P. “Direct-driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications”. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, Finish Acad. Technol., issue EI 101, pp. 2-62, 2000.
- LEM, Liaisons Electroniques-Mecaniques. Site, disponível em <<http://www.lem.com/hq/en/content/view/261/200/>>, acessado em 16/12/2011.
- MALINGA, B., SNECKENBERG, J. E., FELIACHI, A. Modeling and Control of a Wind Turbine as a Distributed Resource. Proc. of the 35th Southeastern Symposium on System Theory, pp. 108-112, March 2003.
- MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. L. “Wind Energy Explained – Theory, Design and Application”, 2nd Ed., pp. 103, 2009.
- MELO, G. M., “Um Estudo da Viabilidade de Pequenos Aerogeradores na Produção de Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 2009.
- MULJADI, E., BUTTERFIELD, C. P. and WAN, Y. H. Axial Flux, Modular, Permanent Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications. Proc IEEE Industry Applications Conference, St. Louis, USA, Oct., Vol. 1, p. 174-8, 1998.

- NI – National Instruments, NI USB-621x – DAQ M Series. Manual do usuário, pp. 31-33, abril de 2009.
- NIELSEN, K. H. Technological Trajectories in the Making: Two Case Studies from the Contemporary History of Wind Power. *Wind Energy*, Vol. 52, Issue 3, pp. 175-205, 2010.
- PARK, J., MACKAY, S. “Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems”, pp. 19, Elsevier, 2003.
- PEREIRA, E. J. S., PINHO, J. T., VALE, S. B. “Revitalização do Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico-Diesel de Tamaruteua, Município de Marapanim, Pará”. *Anais do I CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar*, abril de 2007.
- PINHO, J. T., BARBOSA, C. F., PEREIRA, E. J. S., SOUZA, H. M. S., BLASQUES, L. C. M., GALHARDO, M. A. B., MACÊDO, W. N., “Sistemas Híbridos – Soluções Energéticas para a Amazônia”, Ministério de Minas e Energia, 1ª Ed., 2008.
- RISØ National Laboratory and Det Norske Veritas. “Guidelines for Design of Wind Turbines”, 2nd Ed., 2002, p. 4.
- SANTOS, F. M. C. S. “Modelagem e Avaliação de Estabilidade Transitória de Aerogeradores Síncronos com Magneto Permanente em Sistemas de Energia Elétrica”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. PPGEE/UFPA, 2005.
- SLOOTWEG, J. G., HAAN, W. H., POLINDER, H., KLING, W. L. General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 18, N° 1, February 2003.
- SPERA, D. A., “Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering”, ASME Press, 2nd Ed., 2009.
- SPOONER, E. and CHALMERS, B. J. TORUS: A Slotless, Toroidal-Stator, Permanent Magnet Generator. *IEEE Proc.-B*, Vol. 139, N° 6, November 1992, p. 497-506, 1992.

- SPOONER, E., WILLIAMSON, A .C. and CATTO, G. Modular Design of Permanent-Magnet Generators for Wind Turbines. IEEE Proc. on Electric Power Applications, Vol. 143, N° 5, p. 388-95, 1996.
- VALE, S. B. “Monitoração e Análise de um Sistema Híbrido Eólico Diesel para Geração de Eletricidade”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2000.
- VAZ, J. R. P. “Estudo de Turbinas Eólicas Adaptadas a Baixas Velocidades de Vento”. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Brasil, 2010.
- WEG, Manual do Inversor de Frequência, Série CFW-08, Software versão 4.1X 0899.5241 P/9, 2006. Disponível em <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/Inversor-de-Frequencia-CFW-08>>.
- WEH, H. Transverse Flux (TF) Machines in Drive and Generator Application. Proc IEEE Power Tech. International Symposium on Electric Power Engineering, Stockholm, Sweden, Vol. 1, p. 75-80, 1995.
- WOOD, D., “Small Wind Turbines – Analysis, Design and Application”, pp. 227-249, Springer Verlag, 2011.

Trabalho publicado:

AZEVEDO, T. P. S., PINHO, J. T., GALHARDO, M. A. B., BRANCO, T. M. M. Bancada Experimental para Ensaio em Geradores Elétricos Utilizados em Aerogeradores de Pequeno Porte. Anais do IX CLAGTEE – 9th Congress Latin America on Electricity Generation and Transmission, 6 a 9 de novembro de 2011.