

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Engenharia de Computação

Rafael Cunha Gonçalves

SIMULADOR DE TURBINAS EÓLICAS UTILIZANDO MÁQUINA DE
INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO

Timóteo

2014

Rafael Cunha Gonçalves

SIMULADOR DE TURBINAS EÓLICAS UTILIZANDO MÁQUINA DE INDUÇÃO DE
ROTOR BOBINADO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Computação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Campus Timóteo, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Rodrigo Gaiba de Oliveira

Timóteo

2014

Rafael Cunha Gonçalves

SIMULADOR DE TURBINAS EÓLICAS UTILIZANDO MÁQUINA DE INDUÇÃO DE ROTOR BOBINADO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Computação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Timóteo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

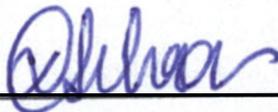
Trabalho aprovado em 25 de agosto de 2014.



Prof. Dr. Rodrigo Gaiba de Oliveira
Orientador



Prof. Dr. Elder de Oliveira Rodrigues
Convidado



Profa. Dra. Viviane Cota Silva
Convidada

Timóteo
2014

AGRADECIMENTOS

O verdadeiro mestre reconhece a forma de ensinar cada um em sua forma particular de aprender, sabe quando deve chamar atenção e quando o silêncio de um abraço é tudo o que se pode oferecer. Agradeço a você Deise, por ser assim.

Ao professor Dr. Rodrigo Gaiba de Oliveira por aceitar o desafio de me orientar em um projeto onde o conteúdo é diferenciado do foco do curso, este gesto me permitiu abrir os olhos para o papel de um engenheiro para com a sociedade.

Agradeço também a todos aqueles que indiretamente participaram para o meu amadurecimento acadêmico, amigos que servem de apoio e direcionam sempre para o melhor caminho.

A minha namorada, por entender a ausência e pelo apoio nas horas difíceis.

Sobretudo aos meus pais, por sempre estarem presentes, sempre dar condições de estudo independente das dificuldades passadas. Foi com a segurança e confiança depositada em mim que consegui chegar até aqui.

Aos meus pais,
por sempre acreditar.

RESUMO

Este trabalho apresenta a simulação computacional de uma turbina eólica, utilizando para esse fim uma estratégia de controle de conjugado eletromagnético, aplicado a uma máquina de indução de rotor bobinado. O projeto deste simulador de turbina tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma estratégia de controle para a máquina de indução, visualizando uma futura implementação física do protótipo em laboratório, permitindo com isso a reprodução das características da turbina eólica em escala reduzida e, conseqüentemente, novos estudos operacionais para viabilizar o aumento da produção de energia elétrica através desta fonte. A máquina de indução de rotor bobinado, escolhida estrategicamente por questões construtivas, é controlada em corrente, através de um controlador proporcional-integral (PI) clássico, devido à grande facilidade de implementação, assim como, por atender plenamente aos critérios de projeto das malhas de controle. A plataforma utilizada como ferramenta de desenvolvimento e simulação de todas as malhas de controle foi o Matlab/Simulink, por proporcionar uma enorme flexibilidade para implementação da estratégia de controle proposta e por possuir uma gama de modelos matemáticos pré-existentes em suas bibliotecas. Desta forma, foi realizada uma análise minuciosa no funcionamento da máquina de indução, assim como, nas demais partes do sistema, permitindo atestar a viabilidade do trabalho realizado.

Palavras-chave: Energia eólica. Simulador de turbina eólica. Controle de máquina de indução de rotor bobinado.

ABSTRACT

This paper presents a computer simulation of a wind turbine, using for this purpose a control strategy of electromagnetic torque applied to an induction machine wound rotor. The design of this turbine simulator has as main objective the development of a control strategy for induction machine, visualizing a future physical implementation of the prototype in the laboratory, thereby allowing the reproduction of the features of wind turbine on a small scale and consequently new studies to ensure the increasing of the operational production of electricity from this source. The induction machine wound rotor, strategically chosen for constructive issues, is controlled in current via a classic proportional-integral (PI) controller, due to the ease of implementation as well as for fully meet the design criteria of the meshes control. The platform used as a development tool and simulation of all control loops was the Matlab / Simulink, by providing enormous flexibility for implementation of the proposed control strategy and to possess a range of pre-existing mathematical models in their libraries. Thus, a thorough analysis was performed in the operation of the induction machine, as well as in other parts of the system, allowing attest the viability of the work.

Keywords: Wind power. Control simulator. Simulator wind turbine

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Evolução mundial da capacidade eólica instalada	10
FIGURA 2 - Potencial eólico brasileiro	11
FIGURA 3 - Características de uma turbina eólica real	15
FIGURA 4 - Turbinas com eixo de rotação horizontal	18
FIGURA 5 - Turbina com eixo de rotação vertical	19
FIGURA 6 - Aerogerador e sua composição	20
FIGURA 7 – Esquema de conexão com a rede	21
FIGURA 8 - Fluxo de potências entre o rotor e a rede	22
FIGURA 9 – Diagrama de ligação do conversor GSC	23
FIGURA 10 - Diagrama de bloco da malha de eixo direto	24
FIGURA 11 - Diagrama de bloco da malha de eixo em quadratura	25
FIGURA 12 - Diagrama de bloco de controle da malha de U_{dc}	25
FIGURA 13 - Tensões trifásicas da rede	28
FIGURA 14 - Resultado da transformada de Clarke	28
FIGURA 15 - Resultado da transformada de Park	29
FIGURA 16 - Variáveis de controle do GSC	30
FIGURA 17- Controle obtido de tensão do barramento CC	31
FIGURA 18 – Variáveis de controle de RSC	32
FIGURA 19 – Controle do conjugado eletromagnético	32
FIGURA 20 – Vista do projeto completo	33
FIGURA 21 – Curva referente à velocidade do vento	34
FIGURA 22 – Curva referente à velocidade do MIRB	35
FIGURA 23 – Correntes trifásicas do MIRB	36
FIGURA 24 – Conjugado mecânico e eletromagnético	36
FIGURA 25 – Potências ativas do sistema	37
FIGURA 26 - -Kit de desenvolvimento do DSP	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Potencial Eólico Brasileiro	10
1.2 Motivação	12
1.3 Objetivos	12
2. ESTADO DA ARTE	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Tipos de vento	16
3.2 Turbinas eólicas	17
3.2.1 Composição da Turbina	19
3.3 Configuração da máquina de indução	21
3.4 Estratégias de controle	22
3.4.1 Conversor do lado da rede	23
3.4.2 Conversor do lado do rotor	25
4. METODOLOGIA	26
5. RESULTADOS	27
5.1 Transformada de Clarke e Park	27
5.1.1 Transformada de Clarke	27
5.1.2 Transformada de Park	29
5.2 Resultados do Simulador	29
5.2.1 Conversor do lado da rede	30
5.2.2 Conversor do lado do rotor	31
5.3 Resultados Gerais	32
5.4 Projeto da banca experimental	36
5.4.1 Máquina de indução de rotor bobinado	36
5.4.2 Processador digital de sinais	37
5.4.3 Conversores para acionamento da máquina	37
6. CONCLUSÃO	38
7. PROPOSTA DE CONTINUIDADE	39
REFERÊNCIAS	40
ANEXO A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO ROTOR	41
ANEXO B – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO CONVERSOR	45
ANEXO C – ORÇAMENTO DOS CONVERSORES	47

1. INTRODUÇÃO

Existem várias formas de captação de uma fonte de energia primária para a conversão em energia elétrica, dentre as quais pode-se citar principalmente a transformação da energia mecânica, através das turbinas hidráulicas e eólicas, a transformação direta utilizando energia solar e a transformação da energia térmica, por fissão nuclear, energia geotérmica e outras. Entretanto, é importante ressaltar que as fontes primárias tradicionais mais utilizadas para a produção de energia elétrica estão praticamente esgotadas, sendo que neste caso novos investimentos em fontes alternativas estão sendo realizados, onde se destaca, principalmente, a energia eólica.

A fonte eólica é obtida pela captação do movimento das massas de ar, pelas pás de uma turbina eólica, também denominado aerogerador, sendo assim transformada em energia mecânica e, posteriormente, tem-se o processo de conversão de energia mecânica para elétrica.

Segundo ATLAS (2001), os primórdios da utilização de energia dos ventos têm data bastante imprecisa, mas, certamente ocorreram há milhares de anos no Oriente. No século XIV, na Holanda, máquinas eólicas já apresentavam uma evolução considerável com ampla aplicação na moagem de grãos, serrarias e bombeamento de água.

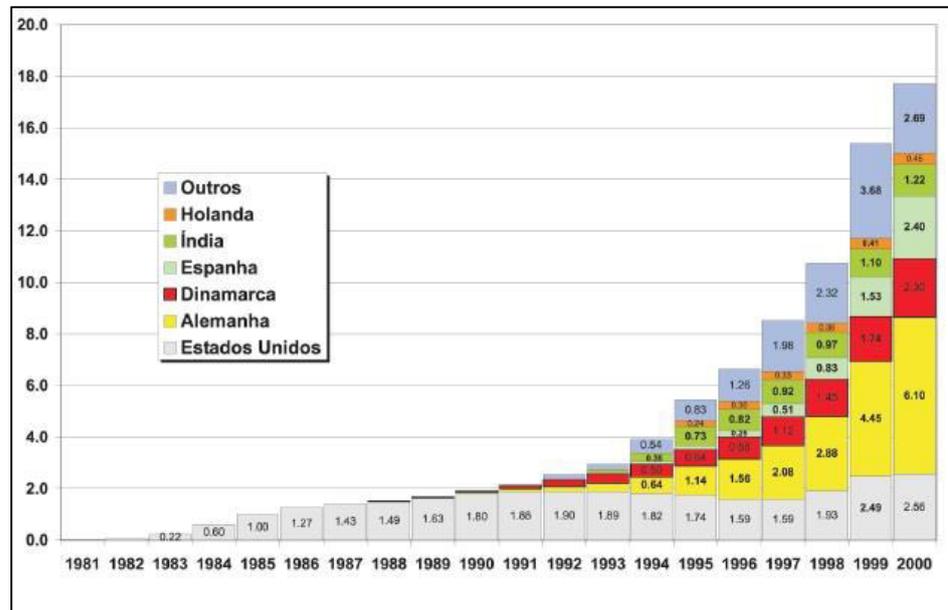
No continente americano, o surgimento da exploração da energia dos ventos foi observado após a abolição da escravatura nos Estados Unidos, em 1863, com a disseminação da utilização do cata-vento multipás para o bombeamento de água.

A chegada desta tecnologia ao Brasil se deu em 1880. Ainda segundo ATLAS (2001), no Brasil a tecnologia foi amplamente apoiada nas décadas de 70 e 80 após a primeira crise do petróleo, contribuindo para alavancar as pesquisas na área de utilização da energia eólica, principalmente, para a geração de energia elétrica em baixa escala (localidades isoladas).

A Figura 1 apresenta a evolução mundial da captação de energia dos ventos, com foco na produção de energia elétrica, onde pode-se observar o crescimento exponencial da utilização da fonte eólica a partir do início da

década de 90. Tal fato ocorreu devido aos incentivos governamentais para a exploração de fontes alternativas e, também, devido ao enorme potencial existente. Adicionalmente, destaca-se a capacidade de produção de energia elétrica com impacto mínimo ao meio ambiente, dando o nome de energia verde à fonte eólica.

Figura 2 - Evolução mundial da capacidade eólica instalada (GW)



Fonte: ATLAS do Potencial Eólico brasileiro, 2001.

Outro fato que contribuiu significativamente para o aumento da geração de energia elétrica, utilizando como fonte primária o vento, foi o desenvolvimento das tecnologias, tanto na área mecânica (aerodinâmica) quanto na área de eletrônica de potência, permitindo com isso reduzir custos e perdas inerentes ao processo.

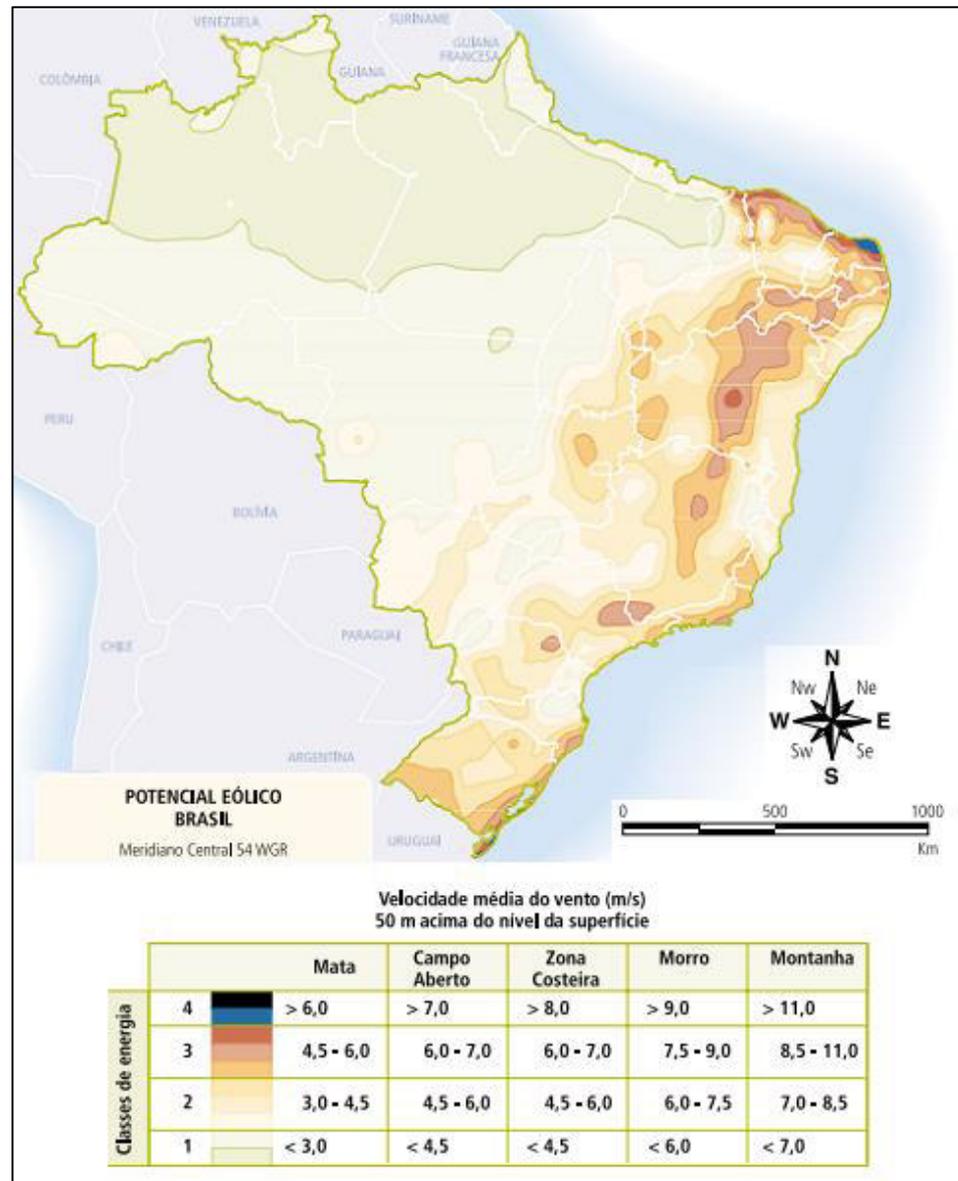
1.1 Potencial Eólico Brasileiro

O potencial eólico brasileiro para o aproveitamento energético tem sido objeto de estudos e inventários desde os anos 1970 e o seu histórico revela o lento mas progressivo descortinamento de um potencial energético natural de relevante magnitude existente no país. (ATLAS, 2001, p. 9)

A matriz energética brasileira é dependente principalmente da fonte hidráulica, explorada pelas diversas usinas hidrelétricas já instaladas no país. O uso da água se justifica pelo relevo (grandes quedas) e a abundância de

bacias hidrográficas no país, entretanto a região nordeste do país, região muito seca, não é beneficiada com esta fonte de energia. Porém, como pode ser visto na Figura 2, é a região onde estão localizadas as melhores áreas para exploração da energia eólica, tornando alguns estados consumidores, como o Rio Grande do Norte, em estados produtores de energia elétrica.

Figura 2 - Potencial eólico brasileiro



Velocidade média anual do vento a 50 metros de altura

Fonte: ATLAS, 2005.

Assim, pode-se observar claramente que a utilização da energia eólica se dará principalmente nas áreas distantes das usinas hidrelétricas, onde a ausência da água é compensada pelo excesso de vento.

1.2 Motivação

O presente trabalho é motivado pela crescente necessidade de novas ferramentas para o desenvolvimento na área de geração eólica, uma vez que essa tecnologia se mostra cada vez mais necessária nos dias de hoje. Espera-se com essa ferramenta possibilitar novos estudos dentro da instituição, para que novas linhas de pesquisa possam surgir.

Além disso, o desenvolvimento na área de captação de energia eólica se faz necessário devido à carência de profissionais e por se encontrar em franco desenvolvimento no país. Por fim, outro fator motivacional é a oportunidade de construção de um projeto que oferece condições para o futuro desenvolvimento de tecnologias de relevante impacto social.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma estratégia de controle do conjugado para uma máquina de indução de rotor bobinado, que será utilizada como um simulador de turbina eólica. Este simulador deverá representar em laboratório o comportamento dinâmico de uma turbina eólica, tornando possíveis novos estudos sem a necessidade de um protótipo em escala real.

Desta forma, um dos principais objetivos propostos é sanar a dificuldade de implementação física da turbina fora do seu campo de funcionamento, assim como simular em ambiente computacional um modelo matemático de uma turbina eólica, utilizando máquina de indução de rotor bobinado.

Com a simulação computacional, busca-se tornar possível uma futura implementação de uma bancada experimental, sendo que para isso o presente projeto visa a especificar devidamente todas as partes necessárias para a sua composição. Esta bancada didática será parte do Laboratório de Eletricidade e Eletrônica, possibilitando a validação experimental dos estudos teóricos e de simulação.

2. ESTADO DA ARTE

Serão apresentadas nessa seção as equações que modelam a turbina eólica desde o início dos estudos na área. A simulação computacional da turbina permite que as variáveis de controle possam ser analisadas e comparadas com dados reais medidos.

Normalmente, a máquina de indução de rotor em gaiola é controlada por um inversor de frequência, padrão industrial, que permite o controle da máquina de indução como um simulador de turbina. Entretanto, essa configuração possui uma série de limitações, em função principalmente de uma série de restrições existentes nos equipamentos industriais.

A aplicação da máquina de indução de rotor bobinado como gerador é amplamente conhecida nos meios acadêmicos, sendo que neste trabalho a mesma será utilizada para acionar um gerador elétrico, fazendo o papel de um simulador de turbina eólica com maior grau de liberdade de controle. As referências disponíveis atualmente serão utilizadas no desenvolvimento da estratégia de controle proposta, assim como serão detalhados os elementos necessários para o conhecimento do sistema de geração.

Segundo Silva (2007), uma turbina eólica consiste em um rotor que extrai energia do vento transformando-a assim em energia mecânica no eixo de rotação, possibilitando assim a transposição da energia cinética no eixo para energia elétrica em um gerador. Na prática, as características de uma turbina eólica podem ser representadas de forma simplificada através de seu Coeficiente de Potência (C_p).

O Coeficiente de Potência determina a quantidade de potência disponível no vento, que poderá ser convertida em potência mecânica por uma turbina eólica. Este coeficiente, em conjunto com a velocidade específica na ponta da pá (λ), é normalmente utilizado para descrever as características de uma turbina eólica, sendo calculado conforme (1).

$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (1)$$

O Coeficiente de Performance (λ_i) pode ser obtido através do ângulo de passo (β) e da velocidade específica na ponta da pá, conforme modelado em (2).

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} + \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2)$$

Desta forma, tem-se a relação entre o Coeficiente de Potência e a velocidade na ponta da pá, que pode ser obtida conforme definido em (3).

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V} \quad (3)$$

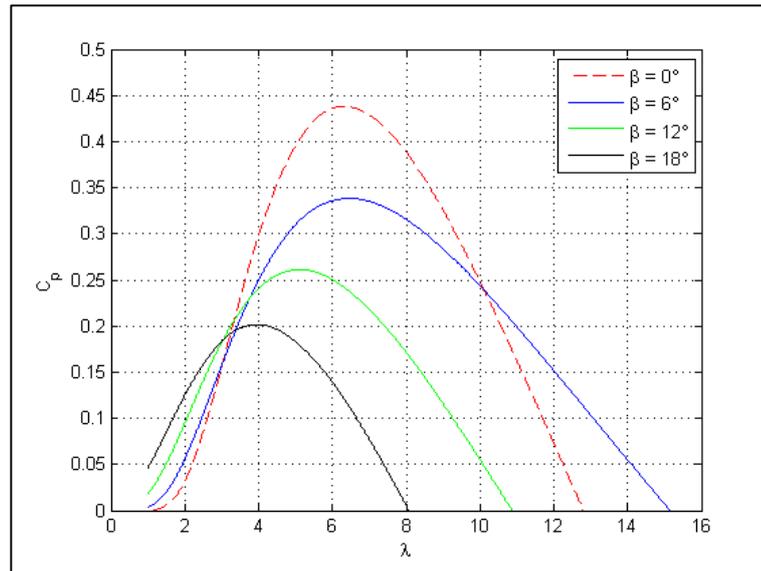
Sendo:

R – raio das pás (m);

ω_r – velocidade de rotação (rad/s);

V – velocidade de vento (m/s).

A Figura 3 ilustra a característica da turbina eólica calculada a partir do Coeficiente de Potência e da velocidade de ponta da pá, para vários valores do ângulo de passo, onde observa-se claramente que a diminuição do ângulo de passo reflete em uma melhora na eficiência de produção de uma turbina, sendo obtida a maior eficiência quando o ângulo de passo é zero. É importante ressaltar que a variação do ângulo de passo é utilizada nas turbinas eólica como forma de controle de energia mecânica absorvida, para ventos acima do valor nominal de operação, normalmente num intervalo de 12 a 25m/s, com a finalidade de preservar a estrutura física da turbina. Esse sistema de proteção aumenta o ângulo da pá em relação ao vento frontal e reduz gradativamente a absorção de potência mecânica, mantendo o fornecimento de potência nominal em condições seguras. Para uma velocidade de vento baixa, normalmente em torno de 5m/s, o ângulo de passo é mantido no seu menor valor possível, possibilitando máxima extração de potência do vento, sendo que esse valor mínimo do ângulo de passo é mantido até o valor de vento nominal, normalmente em torno de 12m/s. Deve-se destacar ainda que ventos acima do valor especificado pelos fabricantes podem destruir a turbina, neste caso o sistema de frenagem é acionado.

Figura 3 - Características de uma turbina eólica real

Fonte: O autor.

A potência mecânica (P_{WT}) de saída da turbina eólica, segundo Silva (2007), é dada por (4).

$$P_{WT} = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (4)$$

Sendo:

ρ – densidade do ar (kg/m^3);

A – área varrida pelas pás da turbina (m^2);

Algumas vantagens na utilização da máquina de indução de rotor bobinado escolhida são pontuadas por Marques (2003, p. 735) como:

a) inversor com custo reduzido, uma vez que a taxa de inversão é tipicamente 25% da energia total do sistema. Isto é porque os conversores só precisam fazer o controle de slip do rotor;

b) redução do custo do filtro do inversor e filtros EMI;

c) robustez e resposta estável da máquina contra perturbações externas.

Na maioria dos trabalhos desenvolvidos nesta mesma área, os autores tendem a validar seu modelo somente com a implementação de um dos motores (motor que simula o eixo de rotação ou motor que funciona como gerador), como visto em Rocha (2008, p. 37): “Como a parte de controle da

segunda máquina como gerador não faz parte do escopo deste trabalho, o torque TG será considerado sempre igual ao seu valor de referência TG*.”

Neste trabalho foi considerado o sistema completo, utilizando o simulador acoplado ao eixo do gerador, o que torna os resultados de simulação mais próximos da realidade.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica necessária para alcançar o objetivo proposto é amplamente conhecida na literatura técnica em relação à parte elétrica e mecânica da máquina, portanto o foco do trabalho utiliza como base as equações existentes da área e se diferencia na aplicação das mesmas.

O desenvolvimento deste trabalho se baseia nas estratégias de controle de uma máquina de indução de rotor bobinado, sendo esta máquina escolhida devido à possibilidade de acesso aos terminais de rotor, aumentando com isso o grau de liberdade para o estudo.

O ambiente utilizado para desenvolver o simulador foi a plataforma Matlab/Simulink®, por oferecer uma biblioteca com os elementos necessários para realização da simulação e, também, devido à *interface* amigável.

Para que seja possível entender melhor os objetivos deste projeto e suas dificuldades é necessário que se conheça melhor sobre alguns tópicos, tais como: a estrutura e os componentes presentes no aerogerador, o modelo do sistema de geração e também sobre as formas de controle, para que possam ser implementadas as malhas de controle dos conversores.

3.1 Tipos de vento

É muito importante que o sistema esteja preparado para trabalhar com variações na coleta do vento. As forças da natureza nem sempre são previsíveis ou seguem o mesmo padrão, gerando a necessidade de que tanto a estrutura quanto os componentes da turbina tenham medidas para lidar com

todas as possibilidades. Diante disto, serão abordados neste trabalho as três variações padrão nos estudos da área, sendo elas:

- a) rajada: comporta-se em forma de pulsos. Se apresenta como um sopro súbito, que excede a velocidade média momentânea. Normalmente é representado com um comportamento senoidal;
- b) rampa: quando a alteração na velocidade do vento ocorre linearmente (ascendente ou descendente) em um determinado período de tempo. Por exemplo, variação na velocidade de vento de 8 m/s para 12 m/s, num intervalo de 5 segundos;
- c) degrau: acontece quando a alteração na velocidade do vento se dá bruscamente, e se mantém infinitamente, como por exemplo, um vento inicial constante de 4 m/s é alterado instantaneamente para 8 m/s, sendo esse o novo valor final.

A velocidade de variação do vento, juntamente com a velocidade do vento em si, são fatores diretos na captação da energia. Uma vez que o sistema não esteja preparado para tais mudanças, toda a infraestrutura pode ser comprometida.

3.2 Turbinas eólicas

Entre os grandes desafios encontrados atualmente, na produção de energia eólica, tem-se como um grande obstáculo a otimização da capacidade de extrair potência do vento, para conversão em energia elétrica, sendo que este fator acontece devido às suas características construtivas.

Os tipos de vento existentes e outras possíveis variações em seu comportamento induzem o desenvolvimento de estudos nos modelos de captação da turbina, fazendo com que variados modelos existam, sendo classificadas por diversos critérios, tais como (SOARES 2012 apud ANEEL 2005):

- a) quanto à direção do eixo de seu rotor, podendo ser denominadas como turbinas de eixo horizontal e vertical;

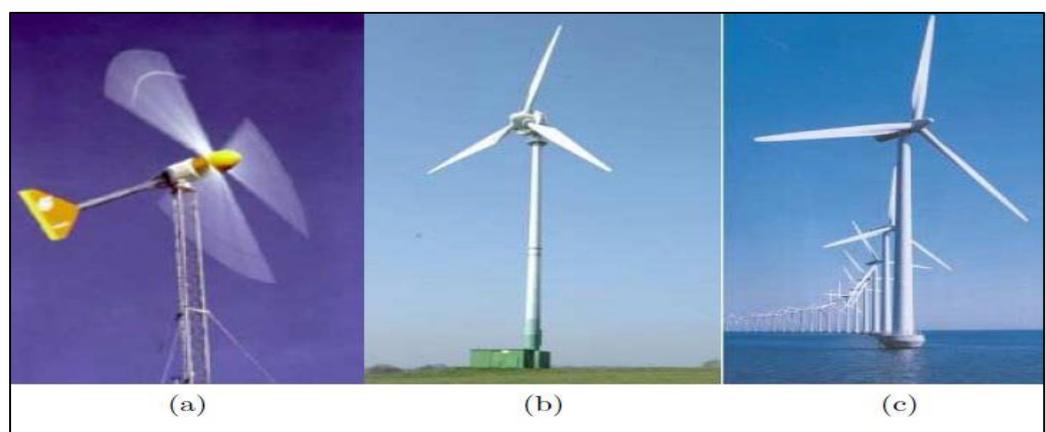
- b) quanto ao número de pás, podendo ter uma pá (monóptera), duas pás, três pás e multipás;
- c) quanto ao controle de potência, podendo ser feito pela aerodinâmica em pá fixa (*stall control*), pela aerodinâmica em pá móvel (*pitch control*) e pelo leme (*yaw control*);
- d) quanto à velocidade de operação, classificadas como velocidade constante e variável;
- e) quanto ao local de instalação, em terra firme (*on-shore*) ou em lagos ou mar (*off-shore*);
- f) quanto ao porte, baixo porte (até 100 kW), médio porte (entre 100kW e 1 MW) e grande porte (acima de 1MW).

Dentre as variadas características existentes, o mercado passou a adotar em sua maioria apenas um modelo, por apresentar melhor custo benefício em relação as demais, conforme destaca Soares (2012, p. 8).

Com o passar do tempo consolidou-se o projeto de turbinas de eixo de rotação horizontal de três pás como topologia comercialmente mais viável para sistemas de geração de energia eólica, devido a características de eficiência e estabilidade estrutural. (SOARES, 2012, p.8)

A Figura 4 ilustra três tipos de turbinas, sendo de pequeno, médio e grande porte, todas com eixo de rotação horizontal, podendo ter aplicações variadas desde o bombeamento de água e geração de energia elétrica.

Figura 4 - Turbinas com eixo de rotação horizontal



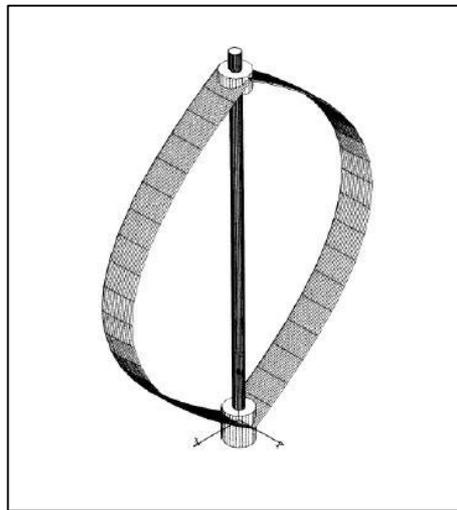
Exemplo de turbinas de pequeno (a), médio (b) e grande porte (c)

Fonte: SOARES, 2012

No Brasil, o modelo amplamente utilizado acompanha a escolha do mercado mundial, onde são utilizadas turbinas com eixo de rotação horizontal e de grande porte, com instalação em terra firme.

A Figura 5 ilustra um modelo de turbina com eixo vertical, sendo sua utilização quase que exclusiva no meio acadêmico, devido principalmente ao fato do seu baixo rendimento. Por outro lado, a mesma apresenta a vantagem na captura do vento em todas as direções.

Figura 5 - Turbina com eixo de rotação vertical



Fonte: OLIVEIRA, 2004

3.2.1 Composição da Turbina

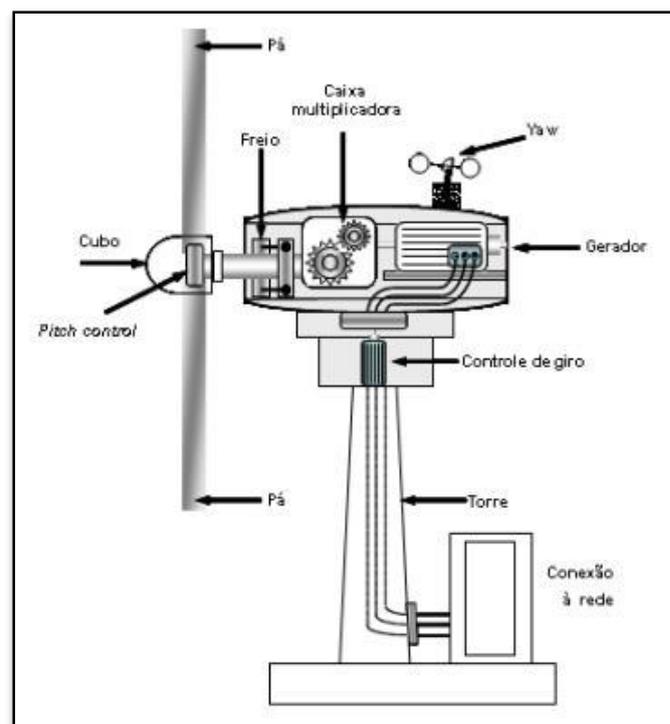
As turbinas eólicas mais modernas, também denominadas aerogeradores, são formadas por uma série de dispositivos que trabalham em conjunto, assim como buscam a otimização do aproveitamento da energia cinética dos ventos e em sua transformação em energia elétrica.

A preservação da estrutura e a otimização da captação do vento são os principais focos do aerogerador, para isso é necessária a implementação de subsistemas na turbina real para que a mesma se torne mais segura e possa se adaptar às mudanças do comportamento do vento. A Figura 6 mostra a localização na turbina dos seguintes elementos:

- a) cubo (Hub): fixam as pás ao rotor de baixa rotação da turbina;

- b) torre: sustenta a estrutura do aerogerador na altura ideal para a captação do vento;
- c) pás: capturam a energia do vento e transferem o movimento para o eixo da turbina;
- d) multiplicador de velocidade (gearbox): acopla o rotor de baixa rotação ao rotor do gerador (alta rotação);
- e) gerador elétrico: converte a energia mecânica rotacional em energia elétrica;
- f) mecanismo de orientação (yaw): realiza o ajuste da direção do aerogerador segundo a direção do vento;
- g) controle eletrônico: controla o gerador elétrico (potência ativa e reativa entregue à rede), ajuste de direção do aerogerador, controle de passo (pitch control), entre outros;
- h) sistema hidráulico: aciona o mecanismo de controle de passo e freio mecânico.

Figura 6 - Aerogerador e sua composição



Fonte: Belo da Silva, 2009.

3.3 Configuração da máquina de indução

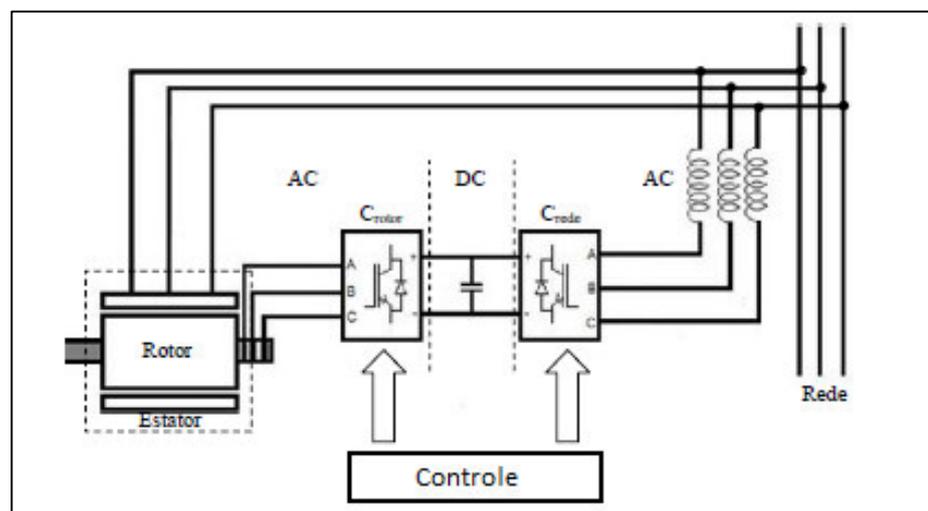
Uma máquina de indução é construída de tal maneira que se têm dois campos magnéticos girantes. É composta de duas partes principais (estator e rotor). De acordo com a forma de alimentação, existem dois tipos:

- máquina de indução gaiola de esquilo, onde só se tem acesso aos terminais do estator;
- máquina de indução com rotor bobinado, que permite acesso tanto no terminal de estator quanto nos terminais de rotor.

A máquina de indução com rotor bobinado foi escolhido devido à sua facilidade de medição e manipulação de todas as variáveis da máquina, permitindo com isso o controle da potência ativa da máquina com extrema facilidade, assim como controle do conjugado eletromagnético, atendendo à proposta do trabalho.

Segundo Ferreira (2009), o esquema de funcionamento do sistema de indução duplamente alimentado configura-se como uma máquina assíncrona trifásica, cujo circuito rotórico, que opera com uma frequência variável (até 10 Hz), se encontra ligado à rede (caracterizada por uma frequência fixa) através de um conversor de frequência AC/DC/AC. Por sua vez, o estator está ligado diretamente à rede, como pode ser visto na Figura 7.

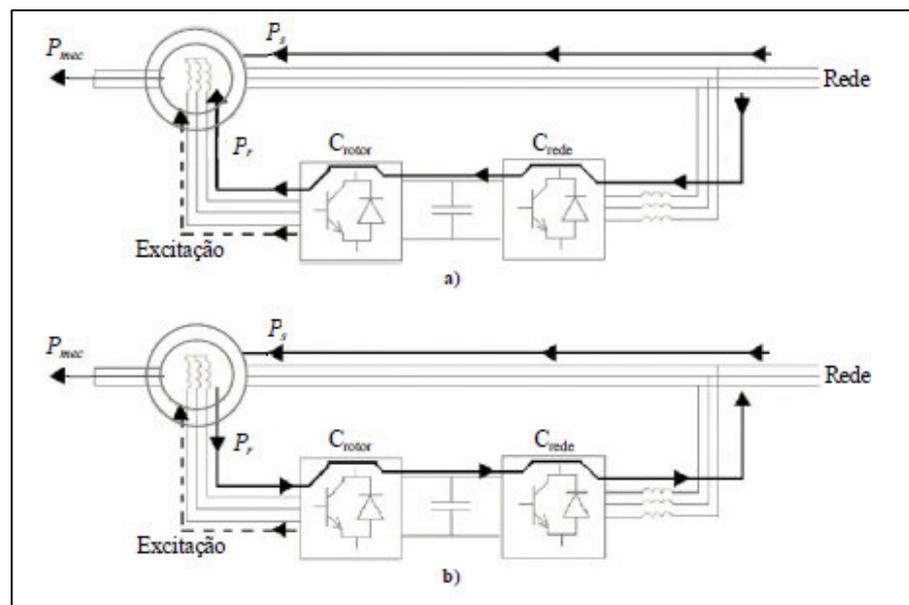
Figura 7 – Esquema de conexão com a rede



Fonte: Adaptado de FERREIRA, 2009, p. 16

O sistema de controle permite que o sentido da energia possa ser alterado de acordo com a disponibilidade momentânea, baseado na velocidade do vento. Tal fato é necessário uma vez que os sistemas reais de geração de energia eólica operam à velocidade variável. O sentido “da rede para o motor” é presenciado em regime subsíncrono e “do motor para a rede” no regime supersíncrono, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Fluxo de potências entre o rotor e a rede



a) Subsíncrono ; b) Supersíncrono

Fonte: Adaptado de FERREIRA, 2009. p.17

3.4 Estratégias de controle

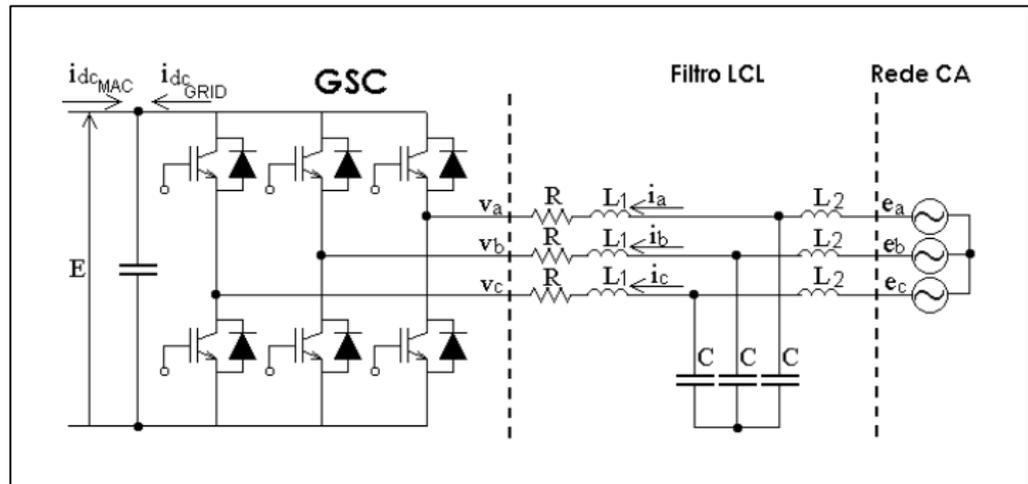
A maioria das aplicações de conversores CA/CC incluem uma malha interna de controle de corrente em suas estruturas de controle. Dentre os objetivos desejados para a malha de controle de corrente pode-se destacar a obtenção de uma resposta dinâmica rápida e sem erros de fase ou amplitude, e a possibilidade de operar o conversor com uma frequência de chaveamento constante ou limitada para garantia a operação segura do dispositivo semicondutor (SOARES, 2012, p. 14)

Utilizou-se neste trabalho o controle baseado em controladores Proporcional-Integral clássico (PI), atuando em referencial síncrono em relação à tensão da rede. A escolha do controlador PI se deve à capacidade de obtenção de erro nulo em estado estacionário, assim como, devido a rápida resposta durante transitórios.

3.4.1 Conversor do lado da rede

Inicialmente, é apresentado em detalhes na Figura 9 o diagrama de ligação do conversor GSC na rede elétrica.

Figura 9 – Diagrama de ligação do conversor GSC.



Fonte: OLIVEIRA, 2009

A partir deste diagrama são obtidas as equações que modelam o sistema, sendo: tensão da rede (5), corrente da rede (6) e a tensão nos terminais do conversor (7).

$$\vec{e} = e_{nd} + j e_{nq} \quad (5)$$

$$\vec{i}_n = i_{nd} + j i_{nq} \quad (6)$$

$$\vec{v}_n = v_{nd} + j v_{nq} \quad (7)$$

Aplicando-se as leis de circuitos elétricos no circuito do conversor GSC, chega-se às equações que regem o fluxo de corrente entre o conversor e a rede, apresentadas em (8) e (9).

$$e_{nd} = R i_{nd} + L \frac{d}{dt} i_{nd} + j \omega L i_{nq} + v_{nd} \quad (8)$$

$$e_{nq} = R i_{nq} + L \frac{d}{dt} i_{nq} - j \omega L i_{nd} + v_{nq} \quad (9)$$

As equações (10) e (11) tratam respectivamente da potência ativa (P) e reativa (Q) que circula pelo conversor. Importante ressaltar que a componente de eixo em quadratura (e_{nq}) é igual a zero, devido ao referencial adotado.

$$P = \frac{3}{2} e_{nd} i_{nd} \quad (10)$$

$$Q = -\frac{3}{2} e_{nd} i_{nq} \quad (11)$$

Neste momento, ressalta-se que a potência ativa é o foco de controle do conversor, via corrente de eixo direto (i_{nd}) e, neste caso, a referência de corrente de eixo em quadratura (i_{nq}) é mantida constante em zero.

Desta forma, as equações (8) e (9) são utilizadas para definição das malhas de controle e sintonia dos controladores e, após a alteração do domínio da equação de tempo para frequência, obtém-se (12) e (13):

$$0 = R_f i_{nd} + L_f s i_{nd} + v_{nd} \quad (12)$$

$$0 = R_f i_{nq} + L_f s i_{nq} + v_{nq} \quad (13)$$

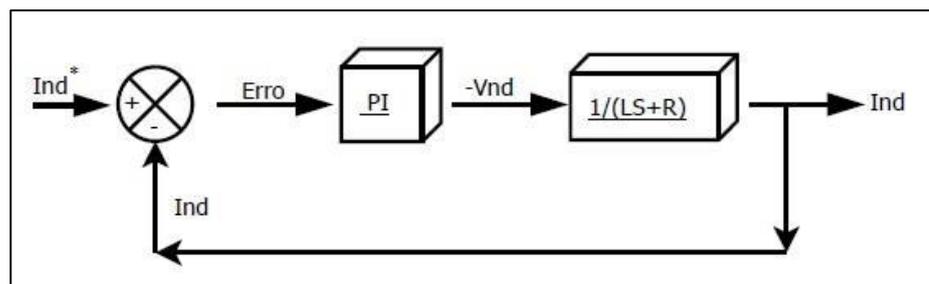
Desta forma, isolando as variáveis de interesse chegam-se as equações (14) e (15), evidenciando que com o controle da tensão nos terminais do conversor é possível controlar a corrente e, conseqüentemente, o fluxo de potência.

$$i_{nd} = \frac{-v_{nd}}{(L_f s + R_f)} \quad (14)$$

$$i_{nq} = \frac{-v_{nq}}{(L_f s + R_f)} \quad (15)$$

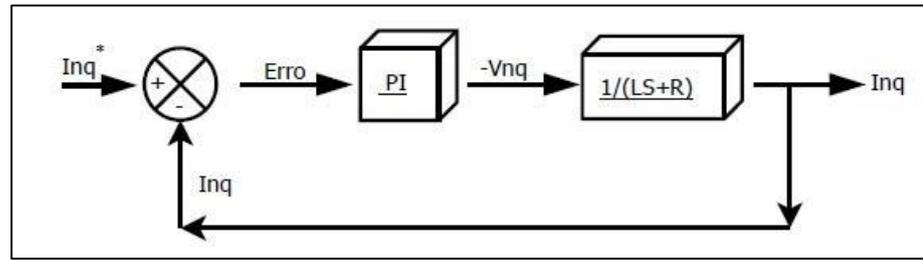
Com isso, pode-se implementar os diagramas de blocos do sistema de controle do conversor GSC para i_{nd} e i_{nq} , como ilustrado nas Figuras 10 e 11 respectivamente.

Figura 10 - Diagrama de bloco da malha de eixo direto



Fonte: O autor.

Figura 11 - Diagrama de bloco da malha de eixo em quadratura



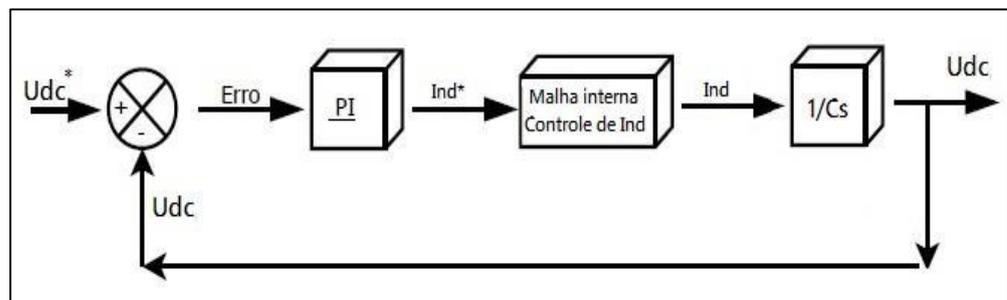
Fonte: O autor.

A malha de controle de tensão (U_{dc}) é externa às malhas de controle de corrente de eixo direto e sofre influência direta da dinâmica de carga do capacitor, presente entre os conversores. A equação que representa a dinâmica de carga do capacitor é dada por (16).

$$U_{dc} = \frac{1}{C_s} i_{nd} \quad (16)$$

A Figura 12 representa o diagrama de bloco da malha externa de controle de tensão do barramento CC, assim como um bloco ilustrando a malha interna de controle de corrente de eixo direto.

Figura 12 - Diagrama de bloco de controle da malha de U_{dc}



Fonte: O autor.

3.4.2 Conversor do lado do rotor

A modelagem matemática e o fluxo de desenvolvimento do RSC são obtidos da mesma forma do conversor do lado da rede, sendo que a única diferença é que as correntes que são controladas são as correntes de rotor de eixo de quadratura (i_{rq}) e de eixo direto (i_{rd}). Da mesma forma feita para o conversor GSC, como o objetivo é controlar apenas a potência ativa, a referência da corrente de rotor de eixo direto é igual à zero.

As equações do circuito de rotor da máquina de indução, utilizadas para implementação das malhas de controle, são dadas por (17) e (18).

$$i_{rd} = \frac{-v_{rd}}{(\sigma L_{rr} s + R_r)} \quad (17)$$

$$i_{rq} = \frac{-v_{rq}}{(\sigma L_{rr} s + R_r)} \quad (18)$$

A relação existente entre a corrente de rotor de eixo em quadratura e o conjugado eletromagnético é apresentada em (19), onde pode ser visto que o conjugado eletromagnético é diretamente proporcional à corrente.

$$T_e = -\frac{3PM\lambda_s}{4L_{ss}} i_{rq} \quad (19)$$

Desta forma, a mesma metodologia para a malha de controle da tensão do barramento CC foi utilizada para o projeto da malha de conjugado eletromagnético.

4. METODOLOGIA

A necessidade da utilização da rede elétrica para alimentar a máquina de indução gerou um dos grandes obstáculos do desenvolvimento do projeto. O comportamento senoidal trifásico da rede não fornece condições para a aplicação direta do sistema de controle. Desta maneira, foi realizado o estudo e o desenvolvimento do algoritmo que implementam as transformadas de Clarke e Park.

Devido à maioria das dissertações, teses e artigos técnicos sobre o tema trabalhar com máquinas de maior porte, normalmente 2MW, foi decidido que a simulação seria implementada em primeira etapa com uma máquina de mesma potência, de forma que se torne possível analisar e comparar os resultados de simulação obtidos com as diversas referências utilizadas neste trabalho.

A implementação das malhas de controle na plataforma Matlab/simulink foi iniciada com as malhas do controle do conversor GSC, por

questões de simplicidade e facilidade. Após a implementação do GSC, o foco do trabalho passou a ser o conversor do lado do rotor, onde estão implementados os tipos de ventos e o modelo da turbina, possibilitando a obtenção do conjugado da turbina.

Com o término do desenvolvimento do simulador foram validados os resultados obtidos pelos sistemas de controle, para isso foram analisados os comportamentos gráficos das principais variáveis de interesse do sistema.

Finalmente foi possível iniciar o projeto de bancada do simulador, onde foi realizado um dimensionamento de cada parte e levantamento dos preços dos equipamentos necessários para a construção da bancada.

5. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com a simulação computacional, seguindo a mesma linha temporal usada no desenvolvimento do projeto.

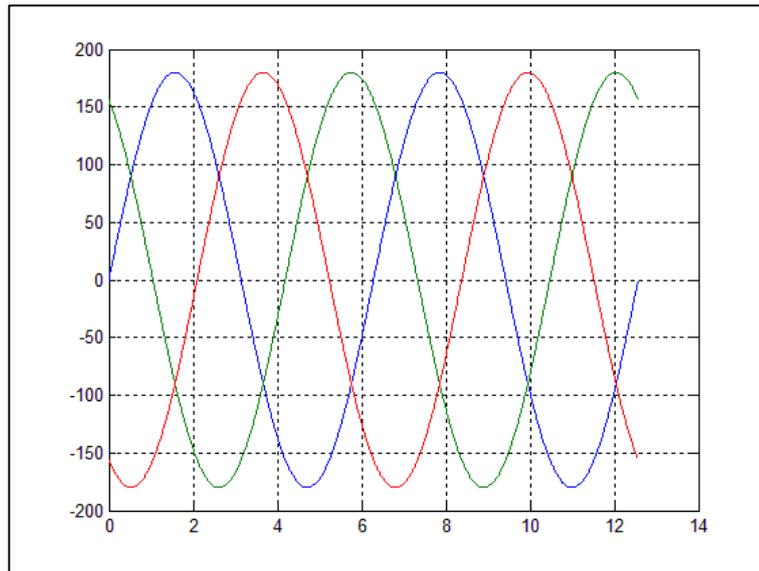
5.1 Transformada de Clarke e Park

Uma vez que as tensões trifásicas da rede elétrica são alternadas, tem-se uma grande dificuldade de impor um valor de referência para as malhas de controle. A fim de contornar o problema foram implementadas na simulação as transformadas de Clarke e Park, que permitem o manuseio de grandezas contínuas.

5.1.1 Transformada de Clarke

As tensões de alimentação da rede elétrica, utilizada para alimentar os circuitos de estator e rotor da máquina de indução, são trifásicas com uma defasagem de 120° entre as fases. A Figura 13 ilustra o comportamento gráfico deste sinal.

Figura 13 - Tensões trifásicas da rede.

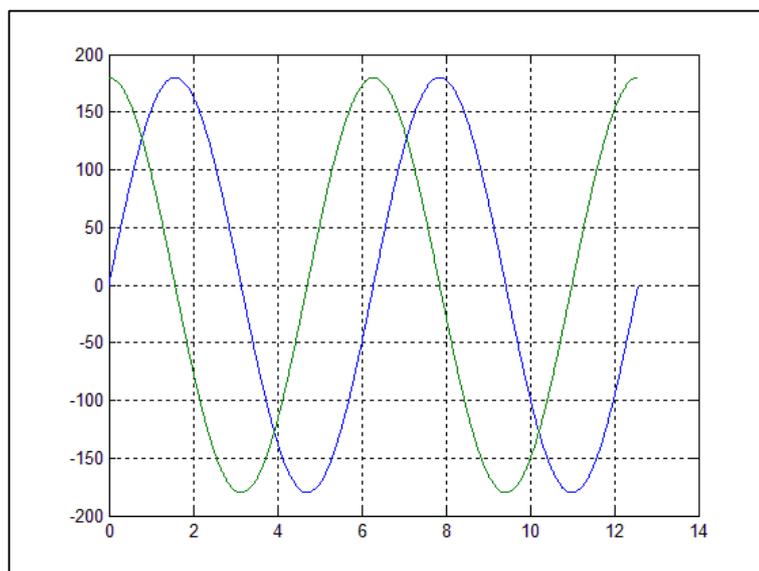


Formato de onda adotado como padrão

Fonte: O autor.

A transformada de Clarke busca eliminar a redundância existente entre as três das fases da rede, uma vez que a soma instantânea dos três sinais é igual a zero e, portanto, conhecidos dois valores o terceiro pode ser calculado. A aplicação da transformada de Clarke é ilustrada na Figura 14, onde pode ser visto um sinal bifásico, com defasagem de 90° .

Figura 14 - Resultado da transformada de Clarke



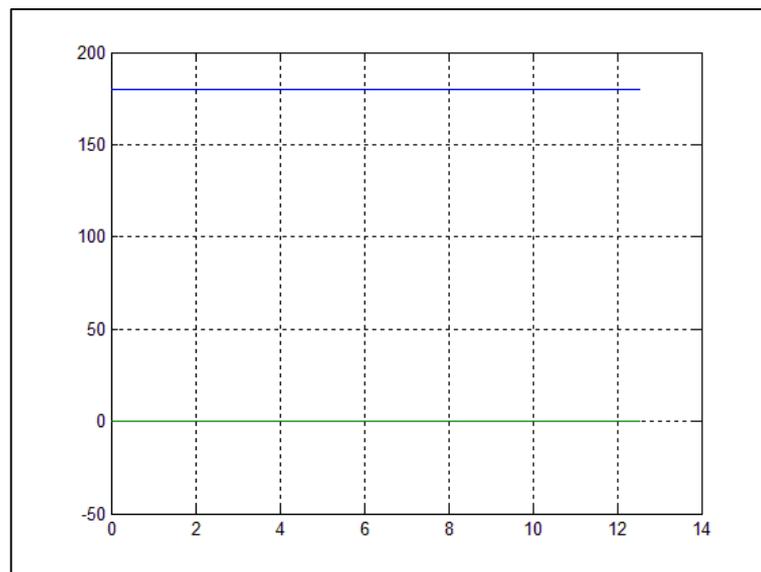
Sinal obtido após aplicada a transformada de Clarke no sinal trifásico

Fonte: O autor

5.1.2 Transformada de Park

Através do cálculo dos ângulos a transformada de Park nos permite chegar ao resultado necessário para controle do sinal, gerando assim dois sinais contínuos que representam respectivamente o sinal máximo e um sinal nulo, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Resultado da transformada de Park



Sinal obtido após a transformada de Park

Fonte: O autor

Com a obtenção dos sinais contínuos é possível a inserção de uma referência de controle (sinal de controle) indicando a amplitude desejada e, também, aplicar a transformada inversa para reconstruir o formato trifásico original da rede.

5.2 Resultados do Simulador

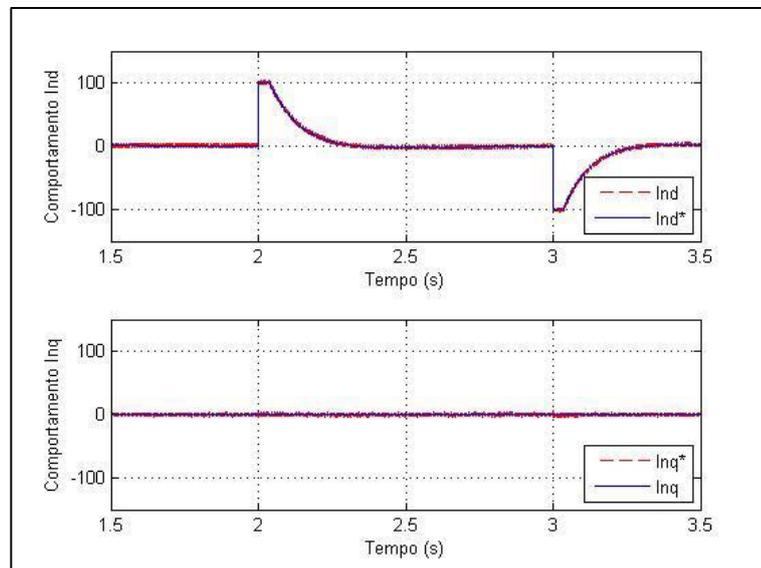
O controle do sistema é dividido em duas partes, conversor do lado da rede e do lado do rotor. O método utilizado para o controle de ambos é o mesmo, através da corrente que circula em cada conversor. Cada conversor tem um objetivo particular, mas ambos têm como objetivo o controle do fluxo de potência ativa.

O conversor do lado da rede tem como objetivo equilibrar o fluxo de potência, com a finalidade de manter a tensão no barramento CC constante. Por outro lado, o conversor do lado do rotor controla o conjugado, a fim de manter o conjugado no eixo proporcional ao conjugado de uma turbina eólica.

5.2.1 Conversor do lado da rede

A Figura 16 ilustra as variações nas correntes de eixo direto e eixo em quadratura, durante um transitório na malha de tensão do barramento CC. Como esperado, apenas a malha de corrente de eixo direto é alterada, em função da referência de corrente enviada da malha externa. Por observar ainda que a malha de corrente de eixo em quadratura, que possui valor de referência igual a zero, não sofre qualquer tipo de influência durante as variações de corrente de eixo direto.

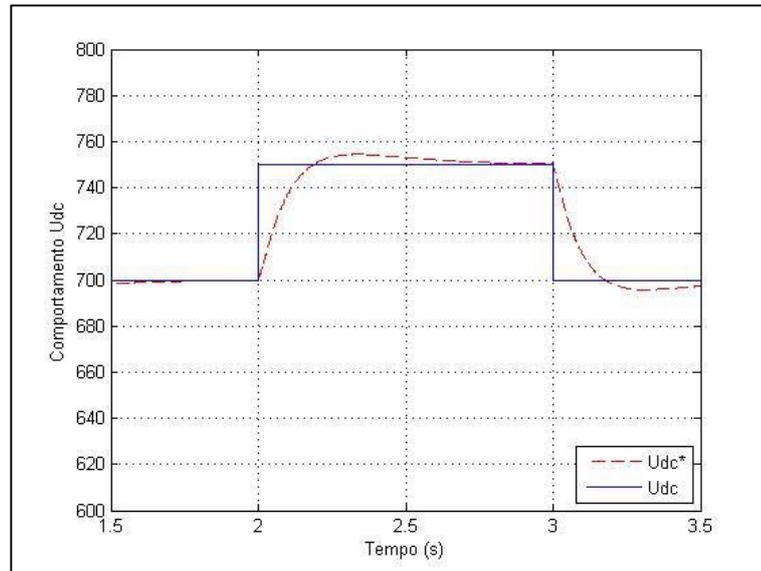
Figura 16 - Variáveis de controle do GSC



Fonte: O autor

A Figura 17 ilustra o comportamento da tensão do barramento CC, para o mesmo transitório de corrente apresentado na Figura 16. Pode-se observar, por inspeção visual, que a tensão está sendo controlada, como desejado, onde foi realizada uma variação em degrau, com amplitude de 50V, sendo o valor inicial de 700V e valor final desejado de 750V.

Figura 17- Controle obtido de tensão do barramento CC

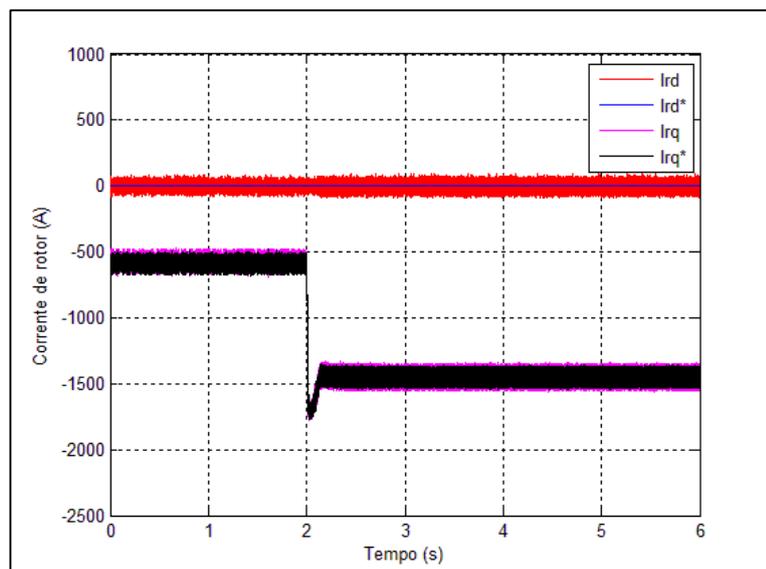


Fonte: O autor.

5.2.2 Conversor do lado do rotor

Nos mesmos moldes do conversor GSC, foi realizada uma variação nas correntes de rotor de eixo em quadratura, como mostra a Figura 18. Destaca-se que a resposta da malha de eixo em quadratura é rápida, permitindo que o valor real acompanhe o valor de referência.

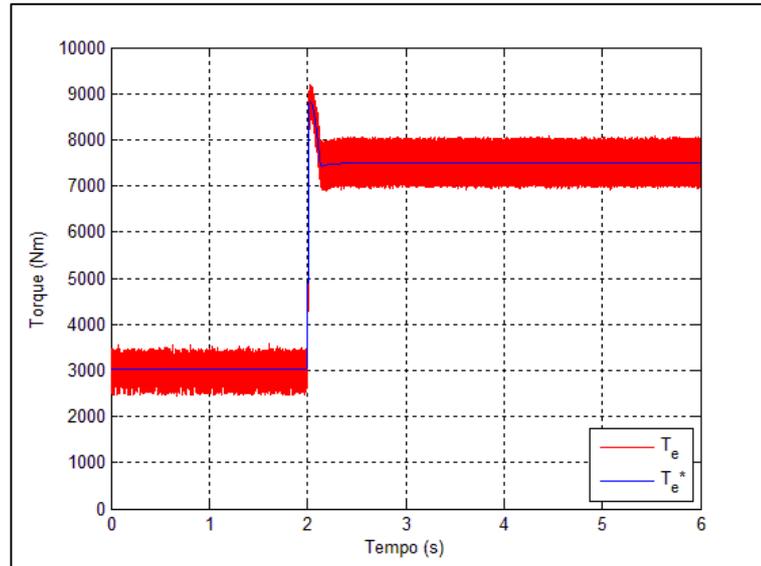
Figura 18 – Variáveis de controle de RSC



Fonte: O autor.

A Figura 19 ilustra a resposta da malha de controle de conjugado eletromagnético, que produziu a alteração de corrente ilustrada na Figura 18. Do mesmo modo visto na malha interna de corrente de eixo em quadratura, pode-se observar claramente que o conjugado da máquina de indução está controlado, conforme alteração no valor de referência de 3kNm para 7.5kNm.

Figura 19 – Controle do conjugado eletromagnético



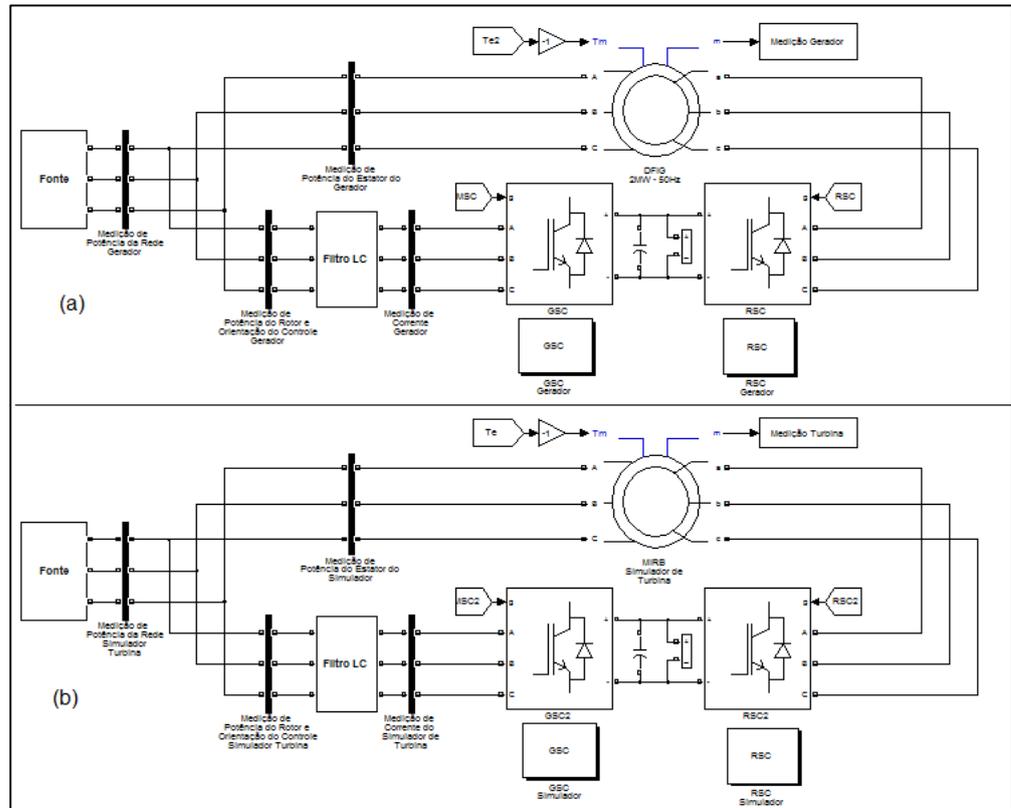
Fonte: O autor

5.3 Resultados Gerais

Após o término da implementação individualizada dos controles de ambos os conversores foi possível dar continuidade ao projeto. Nesta etapa o foco passa a ser o desenvolvimento do simulador de turbina eólica acoplado a um gerador elétrico, possibilitando a análise simultânea dos sistemas (acionamento e geração).

A análise desta simulação, incluindo o gerador, se fez necessária para a realização de testes comuns na área de engenharia especializada no assunto. O fato dos sistemas estarem acoplados e funcionarem em conjunto explicitam possíveis erros e aproxima, ainda mais, os resultados obtidos com simulação computacional da realidade. A Figura 20 ilustra o sistema completo de geração de energia eólica.

Figura 20 – Vista do projeto completo

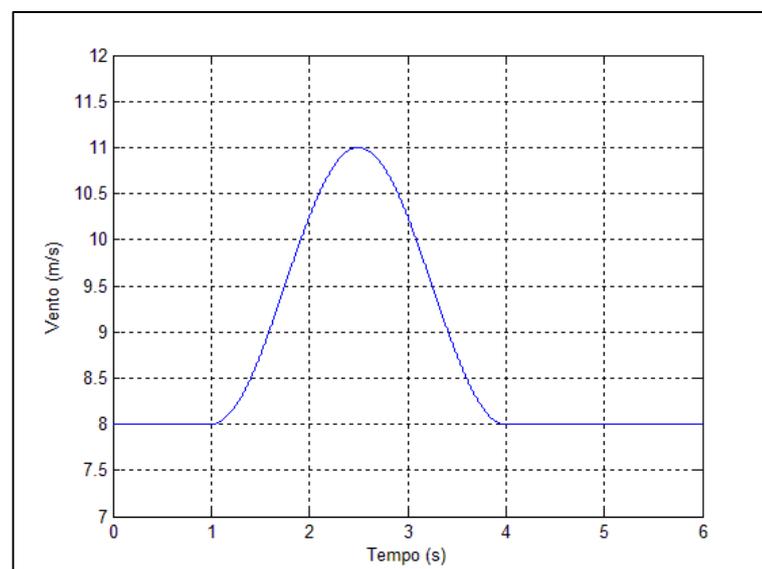


Gerador de energia elétrica (a) e Simulador de turbinas eólicas (b)

Fonte: O autor.

Para os testes no sistema completo foi utilizado um vento real, em rajada, conforme ilustra a Figura 21.

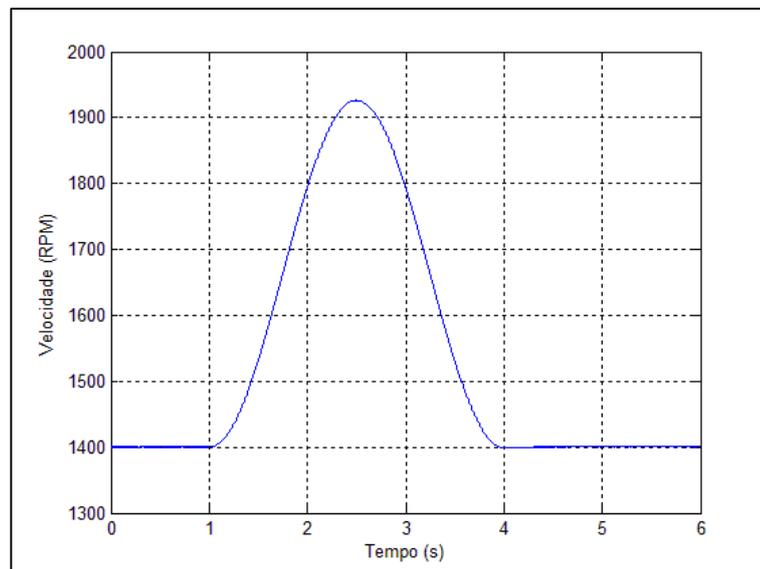
Figura 21 – Curva referente à velocidade do vento



Fonte: O autor

Com a referência na velocidade de vento definida em rajada, o simulador de turbina passa a fornecer um conjugado maior para o eixo do gerador. Conseqüentemente, a velocidade de rotação do gerador aumentará na mesma proporção da velocidade de vento, como pode ser observado na Figura 22. Esse aumento na velocidade de rotação permite que o sistema de geração passe a fornecer maior potência ativa para a rede. Adicionalmente, o sistema de geração, que inicialmente está operando na região subsíncrona, cruza a velocidade síncrona (1500 RPM) e passa a operar na região de velocidade supersíncrona, o que produz efeito imediato na contribuição do circuito de rotor para o fornecimento de potência.

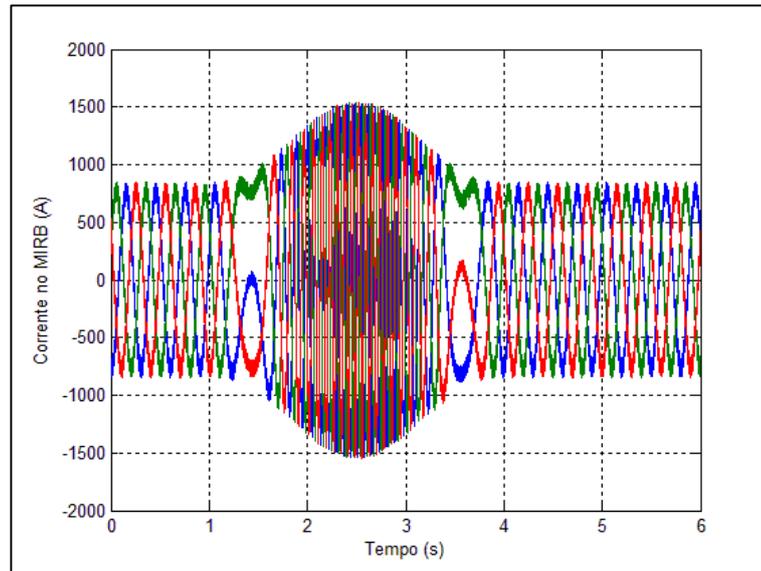
Figura 22 – Curva referente à velocidade do MIRB



Fonte: O autor

O instante em que a máquina sai da região subsíncrona e passa para a região supersíncrona pode ser melhor visualizado na Figura 23, através da análise do comportamento das correntes rotóricas do gerador. Neste momento é importante ressaltar a dependência da frequência das correntes de rotor com a velocidade de rotação do gerador. Esta dependência é mais facilmente observada nos instantes em que a máquina cruza a velocidade síncrona ($t=1.5s$ e $t=3.5s$), onde pode ser visto a aplicação de corrente contínua nos terminais de rotor, ou seja frequência zero, e após esse momento ocorre a inversão de fase e também a inversão no fluxo de potência ativa no circuito de rotor.

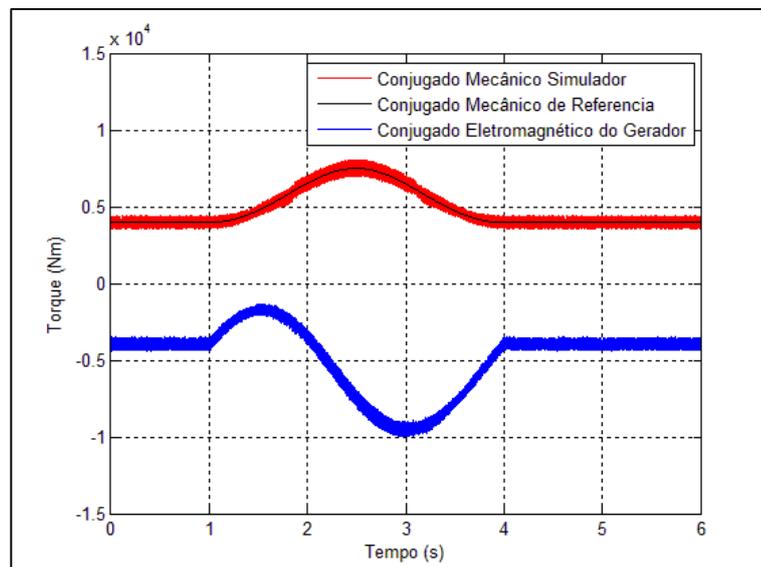
Figura 23 – Correntes trifásicas do MIRB



Fonte: O autor

O conjugado mecânico desenvolvido pelo simulador de turbina eólica, o valor passado como referência ao controlador e conjugado do gerador podem ser vistos na Figura 24. Observa-se claramente que as malhas de controle, conjugado e corrente, proporcionam uma operação suave do sistema de geração, mantendo o valor real igual ao valor de referência, mesmo com o acoplamento existente com a carga, neste caso o gerador elétrico. Isso demonstra que os controladores escolhidos satisfazem os requisitos do projeto.

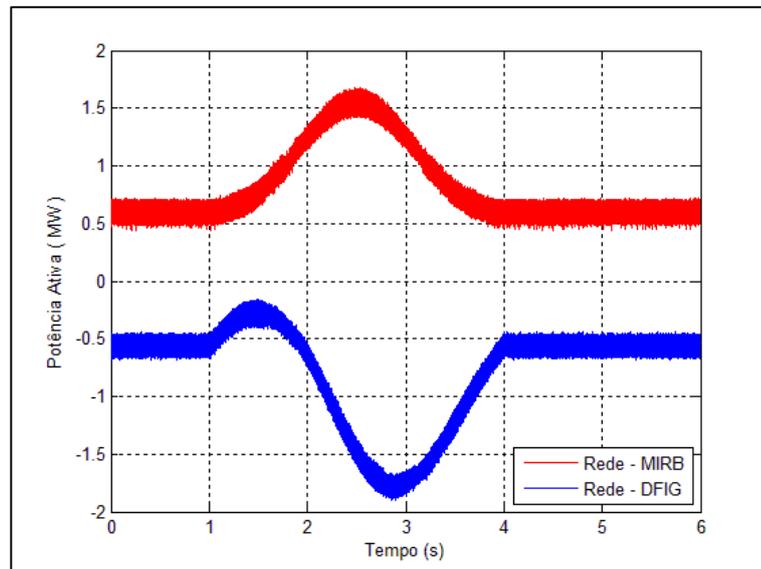
Figura 24 – Conjugado mecânico e eletromagnético



Fonte: O autor

De forma análoga ao comportamento do conjugado, o fluxo de potência ativa entre a rede e o sistema de geração é ilustrado na Figura 25, onde pode ser visto que simulador de turbina absorve potência da rede (valores positivos) enquanto que o gerador fornece energia para a rede (valores negativos).

Figura 25 – Potências ativas do sistema



Fonte: O autor

5.4 Projeto da banca experimental

Como já destacado anteriormente, para que o desenvolvimento de novos estudos e também para a validação experimental dos dados de simulação uma montagem em laboratório é necessária.

5.4.1 Máquina de indução de rotor bobinado

Foi estipulado que o motor deva ser uma máquina com rotor bobinado e estar na faixa de 3 a 5 KW de potência, sendo assim possível ser alocado em laboratório. O orçamento desta máquina, com todos os sensores, para a bancada foi feito e pode ser obtido com o preço final aproximado de R\$ 250.000,00. O orçamento elaborado pelo fornecedor se encontra no Anexo A.

5.4.2 *Processador digital de sinais*

O processador digital de sinais (DSP) permitirá que a lógica do sistema se torne embarcada, eliminando a necessidade de um computador específico para controle do sistema de geração.

O modelo TMS320F28335 tem todos os requisitos mínimos necessários e sobressai aos concorrentes por trabalhar com ponto flutuante que, apesar de mais caro, representa melhor números inteiros, facilita a programação e é mais preciso. O kit de desenvolvimento, ilustrado pela Figura 26 se encontra no mercado na faixa de preço de R\$ 2.000,00.

Figura 26 - -Kit de desenvolvimento do DSP



Fonte: VIEIRA, 2013

5.4.3 *Conversores para acionamento da máquina*

O conversor especificado para a bancada a ser desenvolvida é o modelo *SKS 35F B6U+E1CIF+B6CI 21 V12* da renomada empresa Semikron.

Para que se pudesse chegar ao modelo específico deste conversor foi necessário um levantamento das futuras características e necessidades do projeto, sendo as principais:

- a) módulo contendo 6 IGBT's mais um IGBT para frenagem do barramento DC, barramento DC com capacitores, retificador não controlado na entrada com potência total de aproximadamente 2 KW;
- b) tensão no link DC de 500V, neste caso deverá ser adotado o barramento CC com ligação para até 900V;
- c) tensão de saída próxima de 220V fase-fase;
- d) frequência de chaveamento dos IGBTs de 15kHz, visto que o sistema deverá operar mesmo com 10kHz;
- e) chave para acionar um chopper de frenagem afim de dissipar o excesso de tensão no barramento CC, quando necessário;
- f) sensores de medição de corrente e tensão, por fase.

As especificações do modelo fornecido pelo fabricante e o orçamento realizado afim de atender a demanda se encontram nos Anexos B e C respectivamente. O valor dos dois conversores foi orçado em R\$ 4.810,08.

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu a simulação da estratégia de controle proposta, permitindo simular as características operacionais da turbina eólica escolhida.

A simulação é bastante didática, pois permite que o motor seja estudado em sua totalidade, possibilitando a retirada de várias medições e a implementação de práticas de estudo.

A conclusão do projeto contribui para novos estudos na área com foco no gerador, uma vez que o simulador da turbina já se encontrará implementado. Os resultados apresentados neste trabalho fornecem as condições necessárias para o início da construção física do simulador.

O levantamento dos equipamentos para o projeto da bancada foi realizado, nele se encontram os principais itens para a construção da

bancada. A forma com que os equipamentos foram orçados facilita em uma futura busca pelos mesmos.

A conclusão deste trabalho permite que seja avaliado todo o processo de aprendizado utilizado. O projeto desenvolvido explora áreas pouco abordadas em disciplinas do curso, sendo assim partiu-se de um conhecimento muito básico sobre o tema e sobre a ferramenta utilizada e foram cumpridos todos os objetivos propostos.

7. PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Com o sistema de controle desenvolvido na simulação deseja-se que seja implementada a mesma lógica em hardware. Para isto deve-se transformar o motor utilizado na simulação para um motor menor, que permita sua disposição em um laboratório.

Espera-se que com a obtenção dos equipamentos listados pelo projeto do simulador este sistema de controle seja adaptado à linguagem adequada e implementado fisicamente em laboratório, permitindo assim que uma nova linha de pesquisa seja criada no CEFET-MG campus Timóteo.

REFERÊNCIAS

- ATLAS do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília, 2001. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf >. Acesso em: 25 jan. 2014.
- BELO DA SILVA, Jorge Ney. **Modelagem e Simulação da Máquina de Indução de Dupla Alimentação em Cascata sem Escovas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro.
- FERREIRA, Jorge Filipe. **Controle de Geradores de Indução Duplamente Alimentados em Turbinas Eólicas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Lisboa.
- MARQUES, J; PINHEIRO, H; GRUNDLING, H; PINHEIRO, J.R; HEY, H. **A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System**. In: 7° CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÔNICA DE POTENCIA, COBEP, Fortaleza, 2003. p. 732-738.
- OLIVEIRA, Rodrigo Gaiba de. **Controle e Integração a Rede Elétrica de um Sistema Eólico com Gerador de indução Duplamente Excitado**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte.
- OLIVEIRA, Rodrigo Gaiba de. **Contribuição ao Controle de um Sistema de Geração a Velocidade Variável Utilizando Gerado de Indução Duplamente Excitado**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte.
- ROCHA, Rafael. **Simulação de Aerogerador em uma Bancada Experimental**. 2008. . Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro.
- SILVA, Selênio Rocha; OLIVEIRA, Rodrigo Gaiba de; PARMA, Gustavo Guimarães. **Development of a Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems – Experimental Results**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA, 9, 2007, Santa Catarina: Universidade Regional de Blumenau, 2007. P. 313-318.
- SOARES, Leonardo Tameirão Ferreira. **Contribuição ao Controle de um Conversor reversível Aplicado a um Aerogerador Síncrono a Imãs Permanentes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte.

ANEXO A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO ROTOR

PROPOSTA TÉCNICA

EQUACIONAL ELÉTRICA E MECÂNICA LTDA.

RUA SECUNDINO DOMINGUES 787, JARDIM INDEPENDÊNCIA, SÃO PAULO, SÃO PAULO

TELEFONE (11) 2100-0777 - FAX (11) 2100-0779 - CEP 03223-110

CNPJ: 46.488.482/0001-71 - Inscrição Estadual: 109.248.229.119

Internet: <http://www.equacional.com.br> - E-mail: vendas@equacional.com.br

DATA: 17-JUL-14 **HORA:** 12:53

PARA: UNIFEI

AT.: SR. RAFAEL CUNHA GONÇALVES **TEL.:** (33) 8409-4994

DE: ELISABETE RODRIGUES **TEL.:** (11) 2100-0762
 DEPTO. TÉCNICO DE VENDAS **FAX.:** (11) 2100-0779

N/REF.: DV-27.951/14

S/REF.: E-MAIL DE 16/04/14

ITEM 01: CONJUNTO 1

Grupo Motor-Gerador **montado em base metálica**, composto de:

- a) Máquina de indução com rotor bobinado, potência nominal 4 kVA, 1200 rpm, 60 Hz, enrolamentos do estator configuráveis para operar em tensões nominais de linha (RMS) de 220/380/ 440/760 Volts.
- b) Motor assíncrono trifásico, rotor de gaiola, potência nominal 6 CV, 6 polos, tensão 220/380 V, 60 Hz.
- c) Volante de inércia composto de segmentos, possibilitando variação do momento de inércia do conjunto formado pelas inércias rotativas combinadas dos rotores das máquinas: assíncrona e do motor de gaiola e inércia do volante e eixo de acoplamento entre motor e máquina síncrona, possibilitando variar o valor do momento de inércia desde um valor mínimo (sem nenhum segmento) até um valor máximo com todos os segmentos do volante de inércia colocados.
 Obs: Este volante será montado na ponta de eixo LOA do motor de gaiola.
- d) Transdutor de torque modelo T22/100NM com os devidos acoplamentos.
- e) Encoder (Gerador de Pulsos) modelo HS35N204893CR0.
 Obs: Este encoder será montado na ponta de eixo LOA da máquina síncrona.

Nota: Não está incluso no fornecimento painel de comando/acionamento do motor nem da máquina de indução (gerador)

ITEM 02: Grupos Geradores Síncronos compostos pelos conjuntos 2 e 3

CONJUNTO 2

Grupo Motor-Gerador **montado em base metálica**, composto de:

- a) Máquina síncrona trifásica EGT1-180 ESP B3, potência nominal 4 kVA, 1200 rpm, pólos salientes, 60 Hz, enrolamentos do estator configuráveis para operar em tensões nominais de linha (RMS) de 220/380/ 440/760 Volts, FP:0.8, classe de isolamento: F, tensão de campo nominal 150 volts, corrente de campo máxima 3,8 A (excitação através de anéis e escovas);
- b) Motor assíncrono trifásico, rotor de gaiola, potência nominal 6 CV, 6 polos, tensão 220/380 V, 60 Hz.
- c) Volante de inércia composto de segmentos, possibilitando variação do momento de inércia do conjunto formado pelas inércias rotativas combinadas dos rotores das máquinas: síncrona e do motor de gaiola e inércia do volante e eixo de acoplamento entre motor e máquina síncrona, possibilitando variar o valor do momento de inércia desde um valor mínimo (sem nenhum segmento) até um valor máximo com todos os segmentos do volante de inércia colocados.
Obs: Este volante será montado na ponta de eixo LOA do motor de gaiola.
- d) Transdutor de torque modelo T22/100NM com os devidos acoplamentos.
- e) Encoder (Gerador de Pulsos) modelo HS35N204893CR0.
Obs: Este encoder será montado na ponta de eixo LOA da máquina síncrona.

Nota: Não está incluso no fornecimento painel de comando/acionamento do motor nem da máquina síncrona (gerador)

1) PREÇO UNITÁRIO A VISTA: ITEM 01 - R\$ 78.800,00

ITEM 02 - R\$ 171.900,00

2) IMPOSTOS:

IPI - não incluso (De Lei) - atualmente 0%

ICMS - incluso (De Lei)

NCM – 8502.40.90

3) PRAZO DE ENTREGA: 150 dias a partir da confirmação do pedido por escrito. O desenho de medidas será enviado para aprovação em no máximo 20 dias, após recebimento do pedido de compra. Não nos responsabilizamos por quaisquer prejuízos conseqüentes pelo não cumprimento de obrigações resultantes direta ou indiretamente de causas independentes ao nosso controle, tais como: greves, morosidade da receita federal, atos governamentais, fenômenos naturais, acidentes, incêndio, avaria de maquinário, falhas ou demoras por parte de fornecedores, ou qualquer outra causa abrangido pelo Art. 1058 do Cód. Civil Brasileiro.

4) CONDIÇÕES DE PAGAMENTO: 50% sinal (com o pedido) e 50% a vista (contra aviso de mercadoria pronta para entrega).

5) REVISÃO DE PREÇOS: Os preços para prazos inferiores há um ano são fixos e irremovíveis conforme Lei 9.069 de 29/06/95, porém caso em qualquer momento, por quaisquer razões, principalmente no caso de ocorrerem variações elevadas nos custos dos insumos ou no valor de mão de obra obrigados pelo DRT ou TRT e portanto, o valor expresso em REAIS nesta proposta venha a se tornar insuficiente para manter o equilíbrio econômico-financeiro do fornecimento, seja em decorrência de sua inadequação ou de sua inaplicabilidade, ou por qualquer outra razão, desde que legalmente permitido, as partes, de comum acordo, deverão estabelecer uma forma apropriada para a revisão do valor, com o objetivo de restabelecer o referido equilíbrio econômico-financeiro.

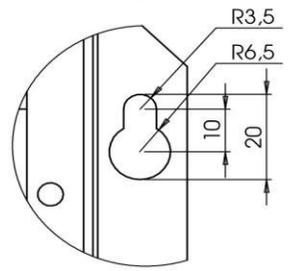
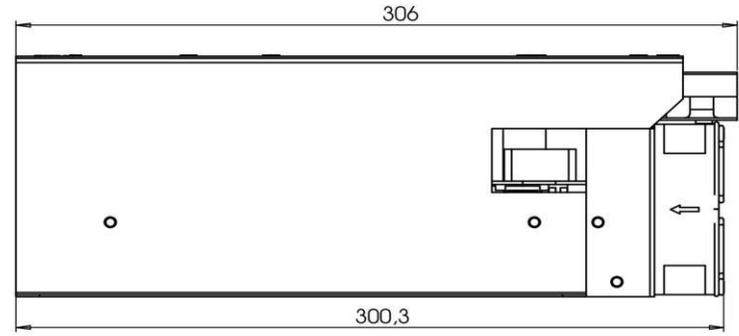
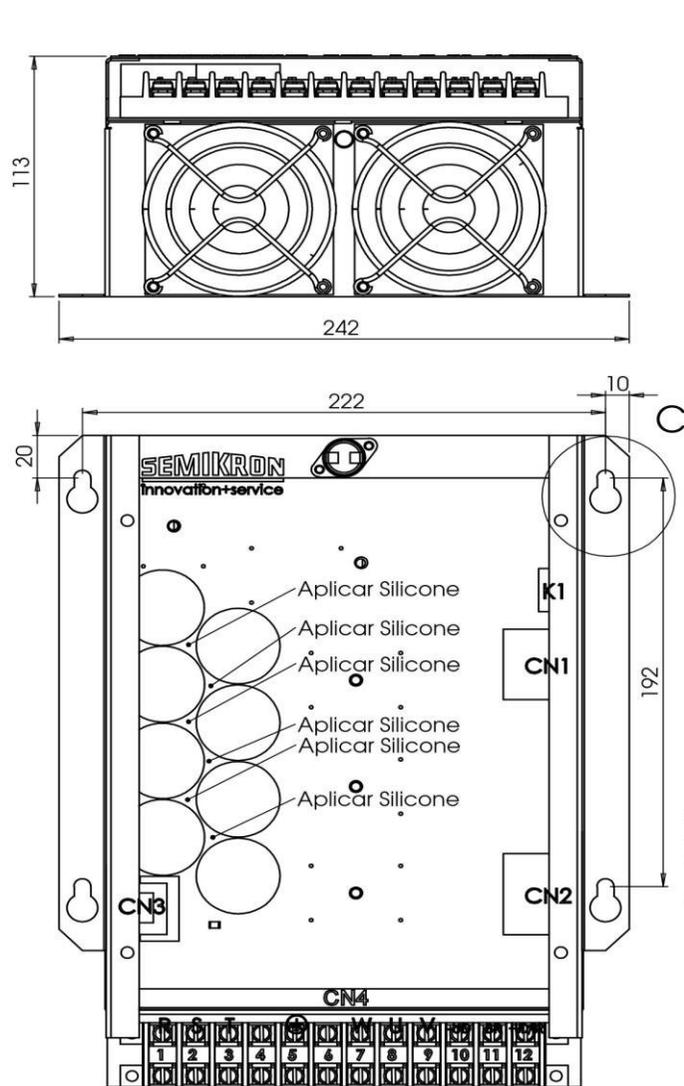
6) ATRASO NOS PAGAMENTOS: Se ocorrer serão cobradas multa de 2%, mais as despesas financeiras da época.

7) EMBALAGEM/TRANSPORTE: Incluso (CIP). Entregue em Itajubá – MG – Laboratório de Engenharia Elétrica da UNIFEI.

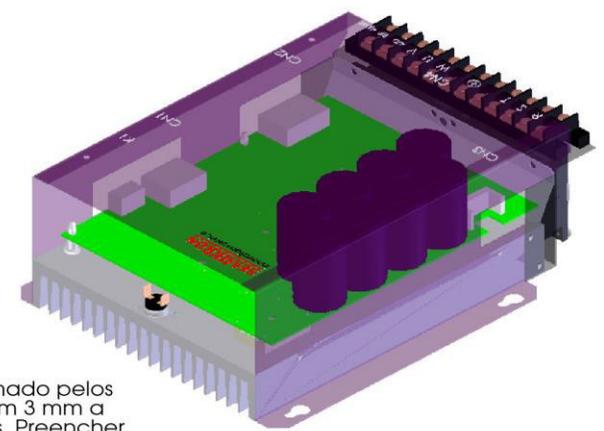
8) VALIDADE DESTA PROPOSTA: 30 DIAS

9) GARANTIA: 12 meses da entrada em operação ou 18 meses da emissão da Nota Fiscal, o que primeiro ocorrer.

ANEXO B – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO CONVERSOR



DETAIL C
SCALE 1 : 1



Aplicar silicone no espaço formado pelos três capacitores sem superar em 3 mm a altura máxima dos capacitores. Preencher apenas a parte superior (profundidade de 10mm máxima e 5 mínima, a partir do topo do capacitor).

PRÓPRIEDADE INDUSTRIAL

DOCUMENTO CONFIDENCIAL

APLICAÇÃO:		DIMENSÕES SEM TOLERÂNCIAS CONF. DIN7168		ACABAMENTO	ESC. 1:2	PESO LIQ.	BRUTO	OBS.	
FEITO DE:		GROSSA: até 6mm MÉDIA: acima 6mm							
		DES.	DATA	NOME	DENOMINAÇÃO				
		24.11.05	24.11.05	F.CONTIERI	CJ MEC 1*P35/260 5*SEMİTOP2				
		APROV.		C.STEFFENINO					
03	10630	25.06.07	FC	SEMİKRON Semicondutores Ltda. Av. Inocencio Seráfico 6300 06365-900 Carapicuíba SP-Brasil		REF.: 1-7-9			
02	9955	23.01.06	FC			NÚMERO	67549900	EDIÇÃO	FOLHA
01	9943	09.01.06	FC					03	1
00	9877	24.11.05	FC						3
REV.	AP/MODIFICAÇÃO	DATA	ORIGEM:	GRUPO 183	SUBSTITUI:				

PROPRIEDADE INDUSTRIAL

DOCUMENTO CONFIDENCIAL

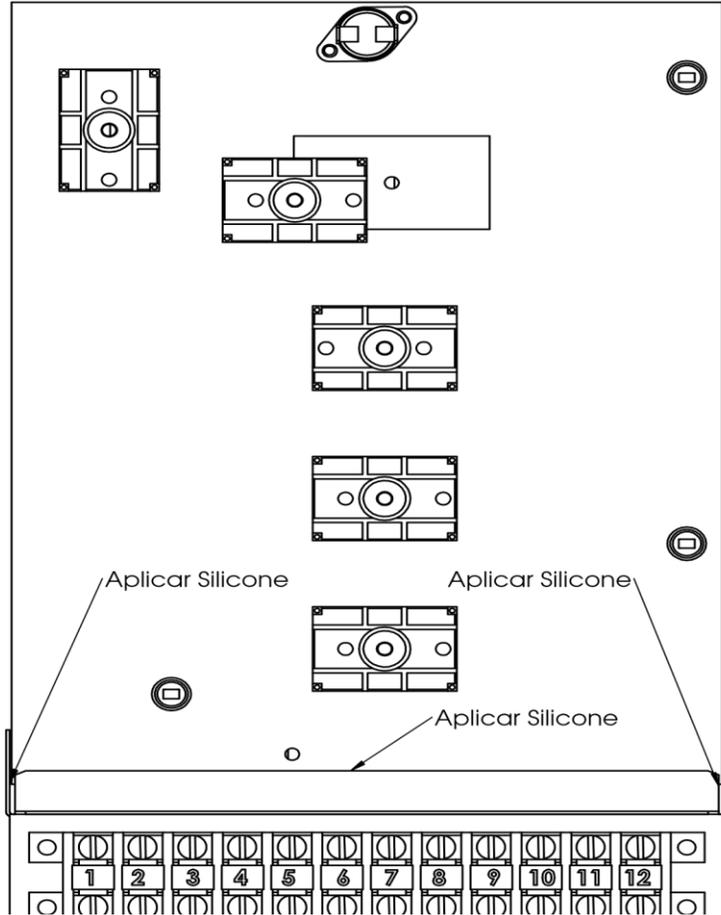


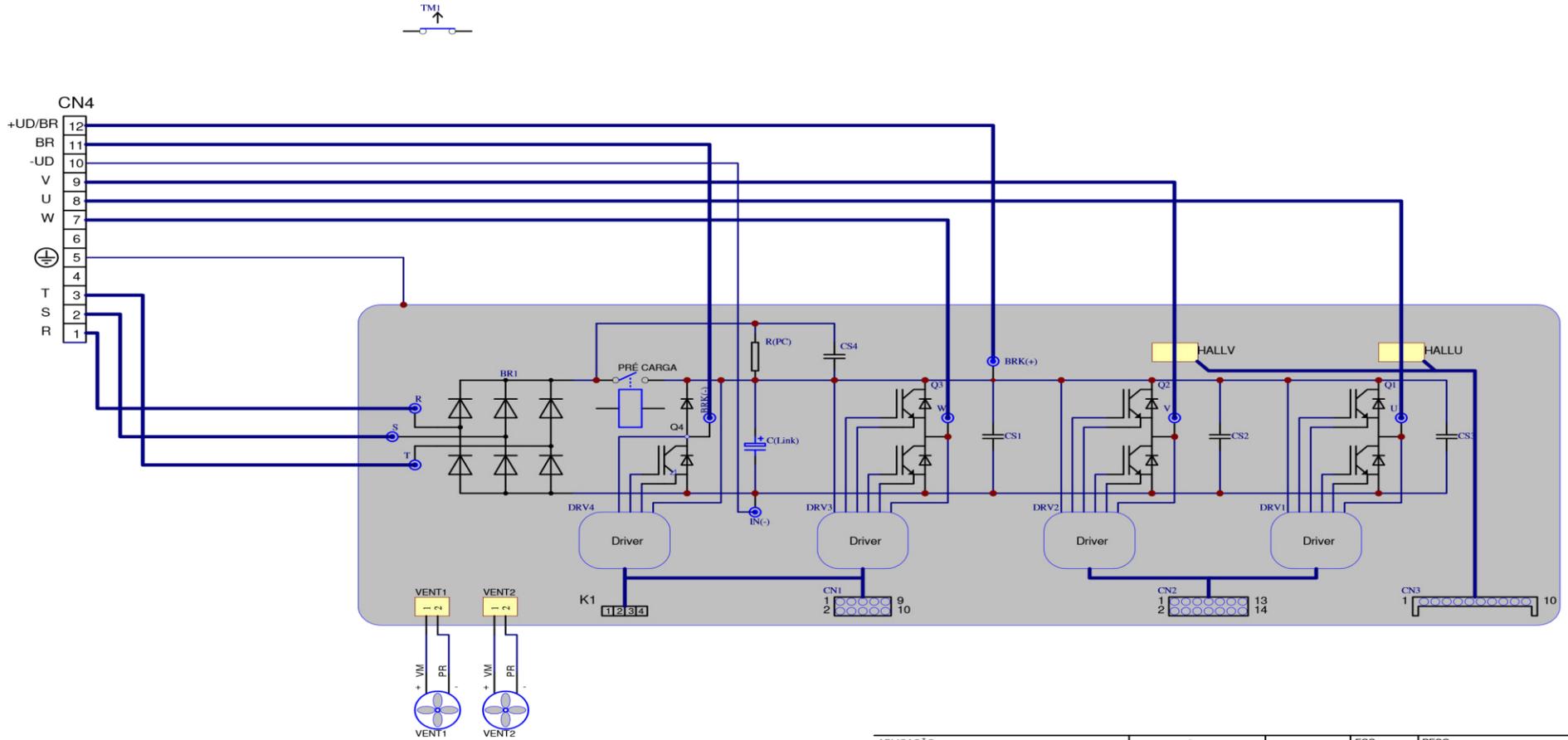
Tabela de Ligações Modelos 08634120, 08634140

DE	PARA	COMPR.(MM)	DESCRIÇÃO	OBSERVAÇÃO
CN4-1	R	290	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os capacitores e a chapa superior pela lateral
CN4-2	S	280	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os capacitores e a chapa superior pela lateral
CN4-3	T	270	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os capacitores e a chapa superior pela lateral
CN4-4				vago
CN4-5	TERRA	120	CABO FLEX 18AWG 600V 105C VD/AM (67491400)	Fixar no dissipador antes da montagem da placa.
CN4-6				vago
CN4-7	W	270	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os drivers e os capacitores
CN4-8	U	280	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	o cabo soldado a placa em U passa por dentro do HALLU na direção da seta e vai ser conectado a CN4-8
CN4-9	V	280	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	o cabo soldado a placa em V passa por dentro do HALLV na direção da seta e vai ser conectado a CN4-9
CN4-10	-UD (IN-)	170	CABO FLEX SILIC 0,5MM2 PT EST (35567800)	passar pelo lado externo junto aos capacitores
CN4-11	BR (BRK-)	300	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar pelo lado externo junto aos capacitores
CN4-12	+UD/BR (BRK+)	310	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os drivers e os capacitores
VENT 1			PRÓPRIO CABO DO VENTILADOR SEM CORTAR	Crimpar nos terminais (67535200) e inserir no receptáculo (675351000, pino 1 vermelho e pino 2 preto).
VENT 2				

Tabela de Ligações Modelo 08634130

DE	PARA	COMPR.(MM)	DESCRIÇÃO	OBSERVAÇÃO
CN4-1	R	295	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os capacitores e a chapa superior pela lateral
CN4-2	S	295	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os capacitores e a chapa superior pela lateral
CN4-3	T	295	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os capacitores e a chapa superior pela lateral
CN4-4				vago
CN4-5	TERRA	120	CABO FLEX 18AWG 600V 105C VD/AM (67491400)	Fixar no dissipador antes da montagem da placa.
CN4-6				vago
CN4-7	W	270	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os drivers e os capacitores
CN4-8	HALL U OUT	170	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	o cabo deve entrar pelo lado contrário ao dos componentes (pci 67485500)
HALL U IN	U	130	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	o cabo deve entrar pelo lado componentes (pci 67485500)
CN4-9	HALL V OUT	145	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	o cabo deve entrar pelo lado contrário ao dos componentes (pci 67485500)
HALL V IN	V	130	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	o cabo deve entrar pelo lado dos componentes (pci 67485500)
CN4-10	-UD (IN-)	170	CABO FLEX SILIC 0,5MM2 PT EST (35567800)	passar pelo lado externo junto aos capacitores
CN4-11	BR (BRK-)	300	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar pelo lado externo junto aos capacitores
CN4-12	+UD/BR (BRK+)	310	CABO FLEX PVC 6MM2 750V 105C PT (62089000)	passar entre os drivers e os capacitores
VENT 1			PRÓPRIO CABO DO VENTILADOR SEM CORTAR	Crimpar nos terminais (67535200) e inserir no receptáculo (675351000, pino 1 vermelho e pino 2 preto).
VENT 2				

APLICAÇÃO:	DIMENSÕES SEM TOLERÂNCIAS CONF. DIN7168	ACABAMENTO	ESC. 1:2	PESO LIQ.	BRUTO	OBS.
FRETO DE:	GROSSA: até 6mm MEDIA: acima 6mm					
	DATA	NOME	DENOMINAÇÃO			
	DES. 24.11.05	F.CONTIERI	CJ MEC 1*P35/260 5*SEMITOP2			
	APROV. 24.11.05	C.STEFENINO				
	0	26.06.07	FC	REF.: 1-7-9		
02	9955	23.01.06	FC	NÚMERO		
01	9943	09.01.06	FC	67549900		
00	9877	24.11.05	FC			
REV.	AP/MODIFICAÇÃO	DATA	NOME	ORIGEM:	GRUPO 183	SUBSTITUIR:
F7PSAP008-03 AP:8000				 SEMİKRON Semicondutores Ltda. Av. Inocencio Senaico 6300 06396-900 Carapicuba SP-Brasil		
				EDIÇÃO	FOLHA	
				03	2	
					3	FLS



APLICAÇÃO:		DIMENSÕES SEM TOLERÂNCIAS CONF.		ACABAMENTO	ESC.	PESO BRUTO	
FEITO DE:					MAT. PRIMA		
			DATA	NOME	DENOMINAÇÃO		
			DES. 24.11.05	C.SOARES	CJ MEC 1*P35/260 5*SEMITOP2		
			APROV. 24.11.05	F.CONTIERI			
					REF. 1-7-9		
03	10630	26.06.07	FC	SEMİKRON SEMİKRON SEMİCONDÜTÖRER LİDA Av. Inocência Seráfico 6300 06366-900 Carapicuíba SP-Brasil	NÚMERO	EDIÇÃO	FOLHA
02	9955	23.01.06	FC		67549900	03	3
01	9943	09.01.06	FC				3 FLS.
00	9877	24.11.05	FC				
REV.	AP/MODIFICAÇÃO	DATA	NOME	ORIGEM:	GRUPO 183	SUBSTITUI	ED

ANEXO C – ORÇAMENTO DOS CONVERSORES



PROPOSTA DE VENDA

Por favor, anote estas referências	Cliente Nº Proposta Nº	100 PV70593
------------------------------------	---------------------------	----------------

A
Rafael Cunha Gonçalves

Página 1
Data 24/06/14
A/C (33) 8409-4994 / (31) 8550-3242
Telefone
E-mail
Sua Cotação Nº

Pos	Nº	Descrição	Qty.		Total da	, IPI	Prazo
1	08634140	SKS 21F B6U+E1CIF+B6CI JD.6 Cód. NCM 85412920	2 PC	2.357,88	4.715,76	2	14 semana(s)
Total BRL sem IPI					4.715,76		
IPI					94,32		
Total BRL com IPI					4.810,08		

Proposta

- 1- Preços faturados;
- 2- Condição de pagamento: À Vista;
- 3- ICMS: incluso;
- 4- IPI: à incluir;
- 5- Valor mínimo por Pedido: R\$ 3.000,00;
- 6- Itens disponíveis em estoque sujeito à venda;
- 7- FRETE NÃO INCLUSO;
- 8- Prazo de entrega válido após envio do pedido;
- 9- Validade da proposta: 10 dias;
- 10- Caso condição à vista, o pedido será processado apenas após a confirmação do pagamento;