

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**Estratégias de Controle de Sistemas de Geração Eólica  
com Máquinas de Indução**

por

**Angela Cristina de Souza Leitão Guimarães**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**ORIENTADOR: Francisco de Assis dos Santos Neves, Dr.**

Recife, Agosto de 2003.

© Angela Cristina de Souza Leitão Guimarães, 2003



**Universidade Federal de Pernambuco**

**Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONALIZANTE DE

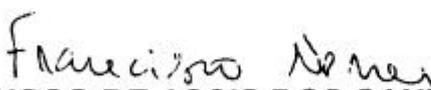
**ANGELA CRISTINA DE SOUZA  
LEITÃO GUIMARÃES**

TÍTULO

**"ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE SISTEMAS DE  
GERAÇÃO EÓLICA COM MÁQUINAS DE INDUÇÃO"**

A comissão examinadora composta pelos professores:  
FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES, DEESP/UFPE,  
EURICO BEZERRA DE SOUZA FILHO, DES/UFPE, CURSINO  
BRANDÃO JACOBINA, DEE/UFPB e ZANONI DUEIRE LINS,  
DEESP/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram a candidata  
**ANGELA CRISTINA DE SOUZA LEITÃO GUIMARÃES**  
**APROVADA.**

Recife, 22 de agosto de 2003.

  
**FRANCISCO DE ASSIS DOS SANTOS NEVES**

  
**EURICO BEZERRA DE SOUZA FILHO**

  
**CURSINO BRANDÃO JACOBINA**

  
**ZANONI DUEIRE LINS**

**Guimarães, Angela Cristina de Souza Leitão**  
**Estratégias de controle de sistemas de geração eólica com máquinas de indução / Angela Cristina de Souza Leitão Guimarães. - Recife : O Autor, 2003.**  
**103 folhas : il., fig., tab.**

**Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Elétrica, 2003.**

**Inclui bibliografia e anexos.**

**1. Fontes alternativas de energia – Eólica.**  
**2. Energia elétrica – Geração – Turbinas eólicas.** **3. Máquinas elétricas (Indução) – Estratégias de controle.** **4. Eletrônica de potência – Estratégia PWM – Utilização. I. Título.**

**621.311.245 CDU (2.ed.)**  
**621.313 CDD (21.ed.)**

**UFPE**  
**BC2004-343**

Dedico este trabalho a meus pais,  
a Luiz e a Maria Luiza.

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus, por iluminar meus caminhos. A meus pais, Angela e Paulo, que apoiaram toda a minha vida acadêmica e profissional. A meu marido, Luiz, por sempre ter me incentivado e colaborado durante todo este trabalho. A minha filha, Maria Luiza, que teve de abdicar das minhas horas de atenção. Às avós, Angela e Cleide, que me ajudaram na tarefa de mãe. Ao meu orientador, Francisco Neves, que esteve lado a lado na realização deste projeto. Ao Professor Manoel Afonso, que primeiro acreditou no meu trabalho. A CAPES que investiu na nossa pesquisa. A todos os colegas do GEPAE, em especial a Severino Nascimento, Marcelo Cabral e André Accioly, por terem colaborado pessoalmente para o término deste trabalho. A todos os funcionários e professores da UFPE, parentes e amigos que direta ou indiretamente contribuíram por mais esta conquista profissional.

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **“Estratégias de Controle para Sistemas de Geração Eólica com Máquina de Indução”**

**Angela Cristina de Souza Leitão Guimarães**

Agosto/2003

Orientador: Francisco de Assis dos Santos Neves, Dr.

Área de Concentração: Processamento de Energia.

Palavras-chave: Turbinas Eólicas, Máquina de Indução, Estratégias de Controle, PWM

Número de Páginas: 103.

**RESUMO:** As perspectivas de um grande número de acessos de turbinas eólicas ao sistema elétrico brasileiro incentivaram estudos sobre os controles desses geradores e os impactos que causarão na rede elétrica.

Este trabalho, dividido em duas etapas, contempla o estudo de técnicas de controle de geradores de indução, com rotor tipo gaiola ou bobinado, quando acionados por turbinas eólicas, conectados à rede ou isolados.

Na primeira etapa, são desenvolvidos os algoritmos de simulação. São analisadas as conexões à rede de aerogeradores com estator diretamente ligado a ela ou duplamente alimentados, com o uso de rotor bobinado. Também é estudado o uso isolado do gerador com rotor tipo gaiola.

Na segunda etapa, são apresentados os ensaios realizados em uma montagem, que simula um conjunto de aerogeração isolada, alimentando uma carga CC.

Todo o trabalho busca analisar estratégias para controle instantâneo das potências ativa e reativa geradas pela máquina de indução. Para o acionamento das máquinas, são escolhidas as técnicas de controle vetorial, incluindo orientação pelo fluxo da máquina, usando o método direto e alimentação em corrente.

Por fim, são apresentados e analisados os resultados dos casos de simulação com conexão à rede elétrica e comparados os resultados das simulações do uso isolado do gerador com o experimental.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **“Control Strategies for Wind Turbines with Induction Generators”**

**Angela Cristina de Souza Leitão Guimarães**

August /2003

Supervisor: Francisco de Assis dos Santos Neves, Dr.

Area of Concentration: Energy Processing

Keywords: Wind Turbines, Induction Generator, Control Strategies, PWM

Number of Pages: 103.

**ABSTRACT:** The perspectives of a great number of accesses of wind turbines to the Brazilian electrical system have stimulated studies on the controls of these generators and the impacts that they will cause in the electrical grid.

This two stages work, considered the study of control techniques of induction generators with squirrel cage type or doubly fed, when set in motion by wind turbines, connected to the grid or isolated.

In the first phase, algorithms of simulation for the study had been developed. The wind generators connection with the grid has been analyzed using the doubly fed rotor. Also it was studied, the isolated use of the generator with the use of the squirrel cage type rotor.

In the second stage, assays in an assembly have been carried through, that simulated a set of isolated wind generation, feeding a DC load.

All work searched to analyze the strategies for instantaneous control of the active and reactive power generated by the induction machine. For the machines motion, the techniques of control strategies had been chosen, including the orientation for the machine flow, using the direct method and chain feeding.

Finally the cases simulation results was presented and analyzed in connection to the electrical grid and the simulations results of the isolated use compared with the experimental one.

# Índice

<b>Capítulo 1</b> .....	1
Introdução .....	1
1.1 Objetivos e Contribuições Pretendidas .....	5
1.2 Organização do Texto .....	9
<b>Capítulo 2</b> .....	11
2.1 Panorama Internacional .....	11
2.2 A Tecnologia atual de Turbinas Eólicas.....	16
2.3 O Estado da Arte.....	26
<b>Capítulo 3</b> .....	34
Modelagem do Sistema.....	34
3.1 Turbina Eólica .....	34
3.2 Gerador de Indução.....	35
3.3 Conversores .....	39
3.4 Modulação por Largura de Pulso (PWM) : Regular Trifásico Simétrico [Seixas, 1988] .....	40
<b>Capítulo 4</b> .....	45
Sistema de Geração Isolado da Rede Elétrica .....	45
4.1 Descrição do Sistema .....	46
4.2 Estratégias e análise dos resultados .....	54
<b>Capítulo 5</b> .....	66
Sistema de Geração Conectado à Rede Elétrica.....	66
5.1 Gerador de Indução com Rotor tipo Gaiola.....	66
5.2 Gerador de Indução com Rotor Bobinado:.....	78
<b>Capítulo 6</b> .....	87
Conclusão.....	87
6.1 Proposta de Trabalhos Futuros .....	89
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	91
<b>ANEXO 1</b> .....	98
<b>ANEXO 2</b> .....	100
<b>ANEXO 3</b> .....	102

# **Capítulo 1**

## **Introdução**

Programas de incentivo às fontes alternativas, como o Proinfa (ANEEL), prometem deter uma atenção especial à geração de energia eólica. Os custos dessa geração já estão cada vez mais se tornando competitivos com as tecnologias convencionais. Até mesmo o fator de capacidade dessas máquinas, atualmente em cerca de 40%, tem evoluído para melhores perspectivas. Hoje, a instalação de uma turbina está por cerca de U\$ 1.000 por kW instalado [NORDEX, 2002] contra aproximadamente uma média entre U\$ 500 e 2000/kW entre algumas possibilidades de usinas hidroelétricas [Annel, 2003], [Eletrobrás, 2003]. Comparando-se então o impacto ambiental, os custos-benefícios da geração a partir dos ventos são ainda melhores.

Embora a geração a partir de turbinas eólicas se apresente no Brasil ainda com resultados em sistemas isolados, o desenvolvimento da tecnologia na área tem dado cada vez mais confiança para injeção de maiores blocos de potência direto na rede.

A energia gerada pelos ventos tem sido explorada comercialmente há pouco mais de 30 anos graças ao desenvolvimento dado pela indústria aeronáutica. Na Europa e Estados Unidos desde a década de 70, com a crise mundial de petróleo,

buscaram-se alternativas para diminuir a dependência do petróleo e carvão [CBEE,2002 ].

No Brasil, a maior difusão de geração a partir dos ventos ainda é no uso de bombeamento d'água e no carregamento de baterias. A conexão de turbinas eólicas à rede elétrica existe em pontos da rede onde a capacidade das fazendas não “perturba” o sistema ou em locais onde a mesma é suprida por sistema de geração a diesel [CBEE,2002].

O conjunto do sistema de aerogeração envolve muitos pontos ainda em estudo, com melhoramentos a serem analisados. A escolha do tipo de máquina a ser utilizada, por exemplo, divide grupos na indústria do setor, ou seja, a opção por uso da máquina síncrona ou de indução. Aspectos econômicos de fabricação ou até mesmo de manutenção entram nessa disputa de mercado. Manter a qualidade da energia e também baixos níveis de interrupção de fornecimento requer o controle das injeções de potência ativa e reativa, o qual pode ser eficientemente realizado com as modernas técnicas de acionamento de máquinas e eletrônica de potência. Valorosas técnicas foram discutidas e grandes avanços foram conseguidos nos últimos anos.

No passado, a geração elétrica com o uso da máquina síncrona só exigia acionamentos com rotação constante. Numa usina hidroelétrica, o ajuste do ponto de operação é feito em função da altura manométrica da água disponível no reservatório, trabalhando de acordo com o máximo rendimento da turbina. A busca por alternativas de energia, despontou os estudos da geração em ampla faixa de velocidade [Rüncos, 2000].

O desenvolvimento das técnicas de controle vetorial por Hasse e Blaschke na década de 70 na Alemanha para as máquinas de corrente alternada e as diversas estratégias de acionamento que foram propostas em seguida abriram caminho para geração com máquina assíncrona, possibilitando o controle com velocidade variável. A partir delas, os controles de fluxo e conjugado podem ser feitos

independentemente e, assim, permitem o controle das injeções de potência ativa e reativa.

Quando os aerogeradores estão conectados a uma rede elétrica alimentada por outras fontes de energia, geralmente com faixas de potência acima de 50 kW, o mais comum é utilizar os geradores de indução com a excitação vinda da própria rede, mas trabalhando com velocidade quase constante. Neste caso o controle de potência e otimização do sistema se dá pelo controle de ângulo das pás. A aplicação de controle com máquinas acionadas a velocidade variável utiliza o gerador conectado à rede através de conversores estáticos. As alternativas mais comuns são o uso de gerador de indução com rotor tipo gaiola, gerador síncrono ou gerador de indução com rotor bobinado. Nos dois primeiros casos, o estator da máquina é conectado à rede através de um conversor CA-CC-CA totalmente controlado. Quando do uso de gerador de indução com rotor bobinado, recomenda-se a conexão do estator diretamente à rede, sendo o rotor alimentado via conversor CA-CC-CA. Em qualquer caso, as técnicas de controle vetorial possibilitam o máximo aproveitamento da turbina, mantendo-se o conjugado eletromagnético de forma a se obter o rendimento máximo em toda a faixa de velocidade. Simultaneamente, realiza-se o controle das injeções de potência ativa e reativa na rede elétrica [Leidhold et al., 2002]. Hoje também há grande disseminação em escala industrial, para geração a baixas velocidades, do uso de máquinas de pólos variáveis [Muljadi and McKenna, 2002].

Devido a intermitência do regime dos ventos, recomenda-se que a potência instalada dos aerogeradores não ultrapasse frações reduzidas da potência de curto-circuito do sistema no ponto de instalação, a fim de evitar problemas de flutuações excessivas de tensão ou de estabilidade. Assim, estudos sobre o impacto da inclusão de geradores eólicos em redes elétricas fracas precisam ser realizados para poderem avaliar melhor esses efeitos. O desenvolvimento de algoritmos de simulação da rede elétrica, incluindo os aerogeradores e seus

controles, se torna imprescindível para a realização de tais estudos. Com o sistema funcionando conjuntamente é possível estabelecer limites de operação.

Este trabalho contempla o estudo de estratégias de controle para geração com velocidade variável, utilizando máquina de indução, através de simulação de algoritmos desenvolvidos e resultados experimentais. Acredita-se que, as técnicas de controle investigadas poderão ser usadas em trabalhos futuros a fim de garantir o atendimento às condições operacionais impostas para o bom funcionamento do sistema de potência, contribuindo para aumentar a qualidade da energia e a confiabilidade do sistema.

## 1.1 Objetivos e Contribuições Pretendidas

O objetivo do trabalho é a implementação e avaliação de técnicas de controle de geradores assíncronos acionados por turbinas eólicas. São estudadas três possibilidades de geração : gerador isolado e gerador conectado à rede elétrica, sendo a máquina de indução com rotor tipo gaiola; e gerador conectado à rede, com rotor bobinado.

As três estratégias de geração são simuladas em velocidade variável, estando incluídos nos algoritmos de simulação: uma fonte primária de energia capaz de impor um conjugado mecânico de entrada; o gerador de indução ( com rotor tipo gaiola ou bobinado); o conversor CA/CC/CA, incluindo a técnica de comando PWM das chaves; a rede elétrica (exceto na simulação de gerador isolado) e todas as malhas de controle.

Na geração isolada, considera-se um gerador de indução com rotor tipo gaiola, onde o estator está conectado a um conversor CA/CC. A fim de permitir a magnetização da máquina, foram incluídas baterias alimentando o barramento CC, as quais são desconectadas quando o gerador é acionado acima de uma velocidade mínima, suficiente para permitir sua auto-excitação. O controle do fluxo do gerador é realizado através da imposição da corrente de estator de eixo direto, em referencial orientado pelo fluxo de rotor. O controle do conjugado é, então, realizado através do controle da corrente de eixo em quadratura.

Considerando notação de motor e, sendo a máquina de indução acionada a uma velocidade ( $\omega_r$ ) positiva, a imposição de conjugado negativo resulta na injeção de potência da máquina para o barramento CC do conversor, tendendo a fazer essa tensão subir. O controle do conjugado é, portanto, realizado com o objetivo de manter a tensão do barramento em seu valor de referência. Valendo salientar que, mesmo havendo potência de entrada disponível, nem sempre ela será aproveitada, pois, se não houver carga suficiente no barramento a tensão subiria.

No segundo caso, o gerador de indução é conectado à rede elétrica pelo estator através de um conversor CA/CC/CA, totalmente controlado. Assim, como no caso anterior, será realizado controle de fluxo e conjugado em referencial orientado pelo fluxo de rotor. A principal diferença é que, agora toda a potência mecânica primária pode ser aproveitada, sendo injetada diretamente na rede trifásica.

O lado do conversor conectado à rede elétrica, através de indutores, será controlado de modo a manter a tensão do barramento CC em seu valor de referência e ainda impor o fator de potência desejado. Para atingir esse objetivo, os indutores e o conversor são modelados, sendo a relação tensão-corrente escritas em referencial orientado pelo vetor tensão da rede. A componente de corrente de eixo direto é controlada para impor a injeção de potência ativa, que mantém a tensão no valor de referência desejado. O controle da componente de eixo em quadratura permite a imposição do fator de potência desejado, devendo ser nula caso se deseje fator unitário.

As componentes de corrente do lado da máquina controlarão o fluxo e o conjugado similarmente ao caso isolado.

A terceira topologia estudada, contempla a chamada dupla alimentação. Nela, o rotor bobinado de uma gerador de indução é conectado à rede através de um

conversor CA/CC/CA controlado pelos dois lados e o estator ligado diretamente à mesma rede.

Com essa ligação, o fluxo de estator é praticamente garantido pela tensão da rede. Sabendo disso, em referencial orientado por esse fluxo, o conjugado eletromagnético (e, portanto, a potência ativa gerada) é controlado pela imposição da componente de eixo direto da corrente de rotor, sendo a componente de eixo em quadratura usada para controlar a potência reativa injetada na rede.

No lado do conversor conectado à rede, as chaves são acionadas de modo a controlar a tensão no barramento CC e impor fator de potência unitário na rede.

Os algoritmos de simulação foram desenvolvidos em MATLAB e em "C". O sistema analisado foi submetido a diversas situações transitórias, validando o desempenho dos controladores e das estratégias analisadas. As simulações também serviram como preparo para a montagem de uso isolado e futuramente para a conexão à rede elétrica, visto que a partir delas também pôde-se ajustar os ganhos iniciais dos controladores PI das diversas malhas de controle envolvidas.

É apresentada, também, a montagem realizada para o uso isolado do gerador. São descritos e analisados os ensaios para obtenção dos resultados experimentais.

As principais contribuições geradas por este trabalho são:

- Desenvolvimento de algoritmos de simulação de sistemas com geradores eólicos incluindo a representação dos conversores e os detalhes relacionados ao controle vetorial;
- Disponibilização dos algoritmos, com a incorporação da rede elétrica, para análise dos efeitos de conexão desses aerogeradores em redes fracas sobre a qualidade da energia. O algoritmo permite a avaliação de aspectos

como flutuações de tensão, aumento do conteúdo harmônico ou redução de estabilidade;

- Implementação de três estratégias de controle vetorial de máquinas de indução aplicadas ao controle de potências ativa e reativa geradas, em nível de simulação;
- Obtenção de resultados de simulação no uso de aerogeradores com máquinas assíncronas em vazio ou com carga, conectados a um barramento infinito;
- Realização de montagem e programação com controle digital para ensaios no gerador isolado;

## **1.2 Organização do Texto**

A organização do texto foi feita de acordo com as etapas desenvolvidas durante a pesquisa e assim, foi dividido em 6(seis) capítulos.

O capítulo 1 resume o uso e as pesquisas desenvolvidas com os aerogeradores. Traz também os objetivos e as expectativas de contribuições dadas pelo trabalho.

O capítulo 2 apresenta primeiramente o estudo de como a geração eólica e as tecnologias das turbinas avançaram até hoje no mundo. Numa segunda parte, explora-se o estado da arte do que se tem desenvolvido nas pesquisas para esse fim.

O capítulo 3 descreve a modelagem matemática dos componentes das topologias estudadas, como: a máquina de indução, os conversores, a turbina e a rede elétrica.

O capítulo 4 detalha a topologia de Geração Isolada, incluindo as técnicas de controle implementadas, e as particularidades de cada malha, como: o estimador de fluxo, controladores de fluxo, injeção de potência pelo gerador, corrente, etc e circuitos inerentes ao desenvolvimento dos algoritmos propostos. São apresentados resultados de simulação e experimentais.

O capítulo 5 apresenta os estudos sobre o gerador de indução conectado à rede elétrica. São apresentadas as estratégias de controle para as duas topologias estudadas (única ou dupla alimentação), as particularidades das malhas e os circuitos que as compõem. Nos resultados de simulação são apresentados o desempenho das técnicas escolhidas.

O capítulo 6 conclui as propostas e resultados apresentados, além de sugerir novas contribuições. Em anexo, seguem as referências bibliográficas utilizadas e outros dados relevantes.

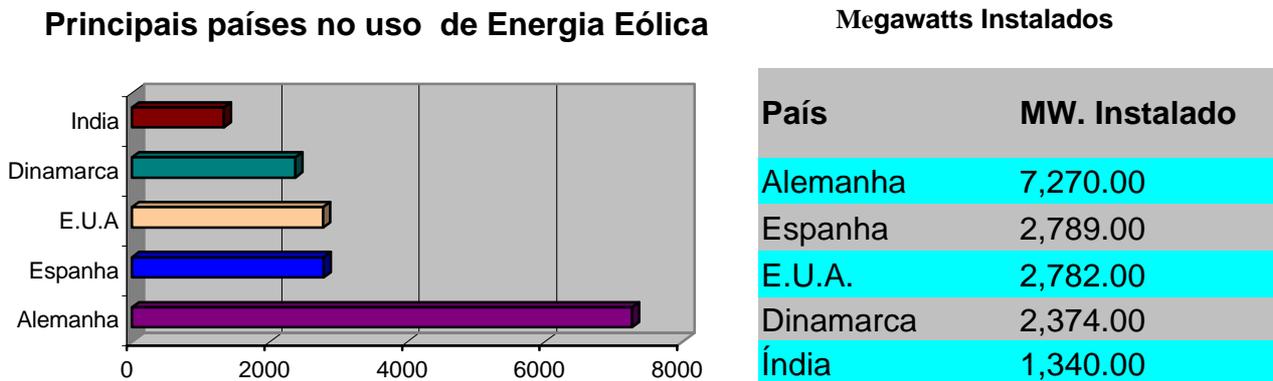
## Capítulo 2

### 2.1 Panorama Internacional

Até 1970 o crescimento e as experiências com fontes renováveis de energia aconteceram em casos isolados. Desde a crise mundial de petróleo o mundo voltou-se para a busca de desenvolvimento dessas técnicas [Rosas, 1997]. A preocupação com o impacto ambiental e até mesmo com o monopólio de geradoras “convencionais” tem mobilizado grandes países para estarem preparados para alternativas viáveis e seguras [Hammons et al, 2000].

Os avanços tecnológicos das últimas décadas elevaram, em particular as turbinas, do uso em sistemas isolados para aplicações em larga escala. Hoje, as turbinas chegam a faixas de até Megawatts, principalmente nas instalações “*offshore*” [Rosas,1997] e [Mandelbaum,2002].

A instalação de aerogeradores a níveis consideráveis de potência elétrica está principalmente disseminada na Alemanha, Dinamarca, Espanha, Índia e EUA, como pode ser observado na Figura 2.1, segundo [ENERCON,2002] .



**Figura 2.1 Ranking dos principais países usuários de Turbinas Eólicas segundo os Megawatts instalados**

Na Dinamarca, a contribuição da energia eólica é de 12% da energia elétrica total produzida; no norte da Alemanha (região de Schleswig Holstein) a contribuição eólica já passou de 16%; e a União Européia tem como meta gerar 10% de toda eletricidade a partir do vento até 2030[CBEE,2002 ].

Líder também na fabricação de turbinas, a Alemanha é hoje um grande referencial das tecnologias aplicadas.

No Brasil, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado[CBEE,2002]. No Nordeste, detentor de 48,9% do potencial eólico [Eletrobrás, 2002], a grande atenção tem sido dirigida para os Estados do Ceará e Rio Grande do Norte, entretanto, não foi apenas nessa costa que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. Em Minas Gerais, por exemplo, uma central eólica está em funcionamento, desde 1994, em um local (afastado mais de 1000 km da costa) com boas condições de vento[CBEE,2002 ].

Atualmente, nove usinas eólicas de médio e grande porte estão em funcionamento no país nos estados de Pernambuco, Ceará, Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina. Juntas, elas geram 22 MW, o que representa 0,03% da capacidade de geração do Brasil, hoje em torno de 83 mil MW, [ANEEL, 2003].

Além disso, segundo o CBEE, existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas – bombeamento e carregamento de baterias para atender comunidades, torres de telecomunicações e outros. Hoje, se trabalha o objetivo de instalar no País 1.000MW em geração a partir da energia eólica até 2005; meta estabelecida durante Encontro do Fórum Permanente de Energias Renováveis, realizado em Brasília.

Mas, a falta de regulamentação no segmento de energias renováveis no Brasil, ainda em fase de Estudos no Governo Federal, inibe a viabilização de projetos e investimentos estrangeiros. Em [Eletrobrás, 2002] afirma-se que na União Européia, 12% de toda energia comprada pelas empresas de distribuição devem ser por lei provenientes de fontes renováveis. Segundo [ANEEL(1),2002], uma das esperanças para o Brasil é o Programa de Incentivo a Fontes de Energia (Proinfa), finalmente regulamentado pelo decreto nº 4.541, de dezembro de 2002. O Proinfa prevê a adição de pelo menos 3,3 mil megawatts de energia eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH's) até 2006. O preço, obviamente, será mais alto do que a energia hidrelétrica, cujas usinas já estão amortizadas. Mas, o Governo decidiu incluir esse custo no *mix* energético do País, rateando entre todos os consumidores. Numa segunda fase do projeto, prevê-se que, em 20 anos as fontes alternativas deverão ser responsáveis por 10% de toda a eletricidade consumida no Brasil. E o mínimo a ser contratado é 15%. Mesmo assim, 74 projetos de usinas eólicas já estão autorizados, somando 5,7 MW, distribuídos entre os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Pernambuco, Rio de Janeiro, Piauí e Sergipe [ANEEL(1),2003]. Já em Fevereiro de 2003, um grupo espanhol recebeu a licença de instalação - parte do licenciamento ambiental - para construir um parque gerador de energia eólica em Osório, no litoral gaúcho. O projeto prevê capacidade instalada de 150 megawatts (MW), num investimento estimado em US\$ 150 milhões, [EFEI,2003].

No Rio Grande do Norte vai operar, com 180,2 megawatts (MW) de capacidade instalada, a usina eólica Parque Eólico Salinas. A usina beneficiará os habitantes

do município de Galinhos e deverá entrar em operação até dezembro de 2005, [ANEEL(2) , 2003].

No município de Marapanim (PA) está autorizada a implantação da usina eólica Crispim. A usina vai operar com 100 unidades aerogeradoras, totalizando 60 megawatts (MW) de capacidade instalada. A obra está prevista para entrar em operação até maio de 2006 e beneficiará 240 mil habitantes, [ANEEL (2), 2003].

Ainda segundo [ANEEL(2), 2003], está autorizada a implantação da usina eólica Santa Marta no município de Laguna (SC). A usina vai operar com 66 unidades aerogeradoras, totalizando 39,6 megawatts (MW) de capacidade instalada. A obra está prevista para entrar em operação até janeiro de 2005, e beneficiará 150 mil habitantes.

Os principais projetos realizados de energia eólica do Brasil, hoje, são mostrados na figura. 2.2.



Figura 2.2 Mapa Brasileiro de Instalações de Turbinas Eólicas até 2002

Na tabela 2.1 pode ser acompanhado um resumo das autorizações de Centrais Geradoras Eólicas no Brasil segundo [ANEEL I,2003] desde 1998 até 2003.

<b>Ato</b>	<b>1998</b>		<b>1999</b>		<b>2001</b>		<b>2002</b>		<b>2003</b>	
	Nº	Potência(MW)								
<b>Autorização</b>	2	15,00	1	2,50	38	3.337,65	46	2.784,40	12	800,80

**Tabela 2.1 Quadro Resumo de Autorizações ANEEL para instalação de Turbinas Eólicas no Brasil**

## 2.2 A Tecnologia atual de Turbinas Eólicas

Para se entender como se faz uso das tecnologias aplicadas às turbinas eólicas, foram analisadas as suas principais características. A figura 2.3 mostra os principais componentes de uma turbina eólica, incluindo os equipamentos mecânicos, elétricos e eletrônicos.

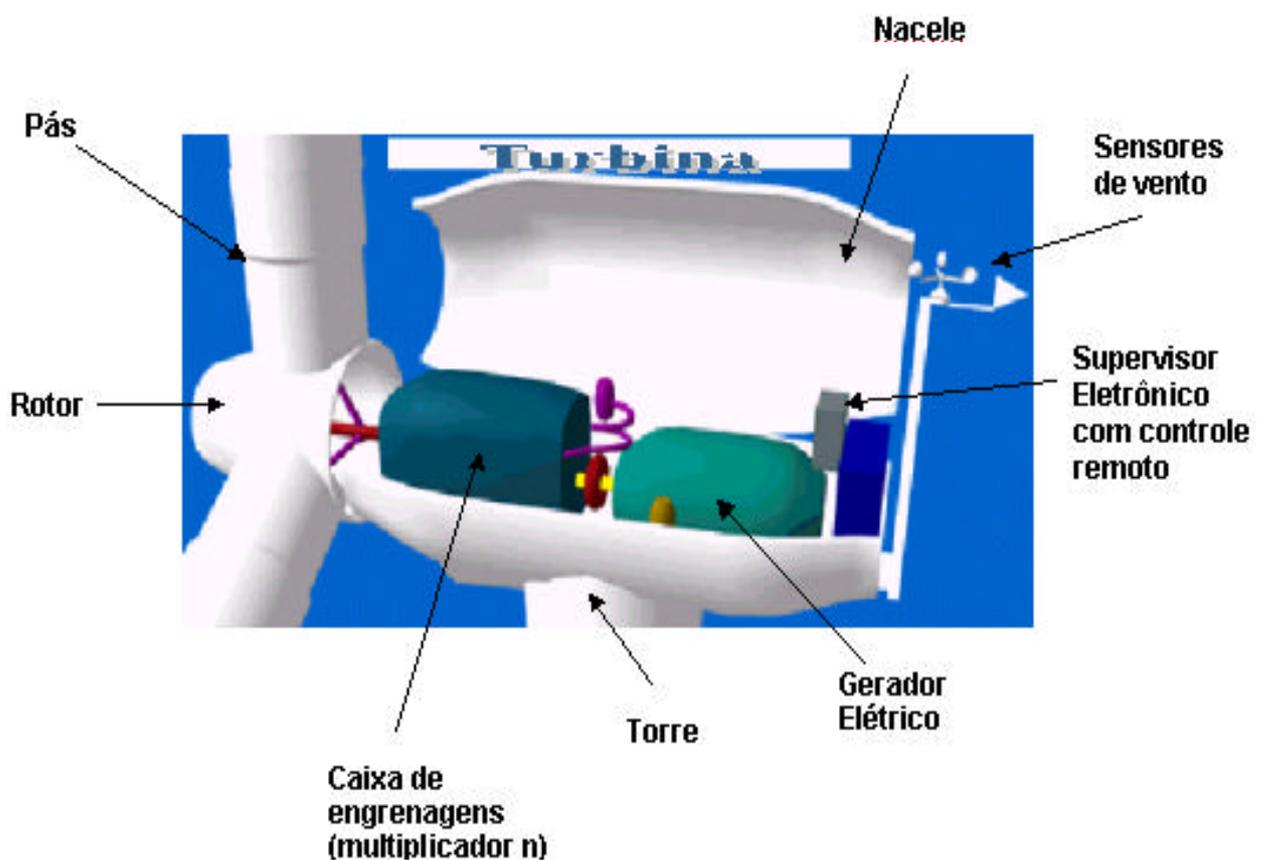


Figura 2.3 Componentes de uma Turbina Eólica

A Nacele é a célula que abriga os componentes eletro-eletrônicos do aerogerador. A área do Rotor é quem determina quanto de energia mecânica a turbina é capaz de extrair dos ventos. Entre o Rotor e o Gerador pode ser encontrada a caixa de engrenagens (**Gearbox**), que é um recurso mecânico multiplicador de velocidade. A unidade de controle e potência se encarrega de monitorar todas as principais funções, uma vez que otimiza de forma contínua um ponto de operação do aerogerador para diferentes condições de vento. A torre é responsável pela estabilidade física do conjunto Rotor-Nacele e é também abrigo para os painéis de controle monitorados pelos operadores locais da máquina.

As equações, estudadas em [Freris, 1990] , [Heier,1998] e [Costa,2001], que descrevem a energia captada dos ventos e a conversão em energia mecânica nas turbinas, são :

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Onde,

E – Energia Cinética (J)

m - massa de ar ( kg)

v - velocidade do vento (m/s)

$$P_d = \frac{1}{2}rAv^3 \quad (2.2)$$

$P_d$  - Potência eólica disponível ( W)

$r$  - densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)

A – Área do rotor da turbina ( m<sup>2</sup>)

Seja,  $C_p$  (rendimento aerodinâmico) o coeficiente de potência, que indica a fração da potência eólica disponível  $P_d$  convertida em potência mecânica no eixo do rotor. Tem-se :

$$P_a = C_p(v) \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.3)$$

Aonde,  $P_a$  - Potência eólica aproveitável ( W )

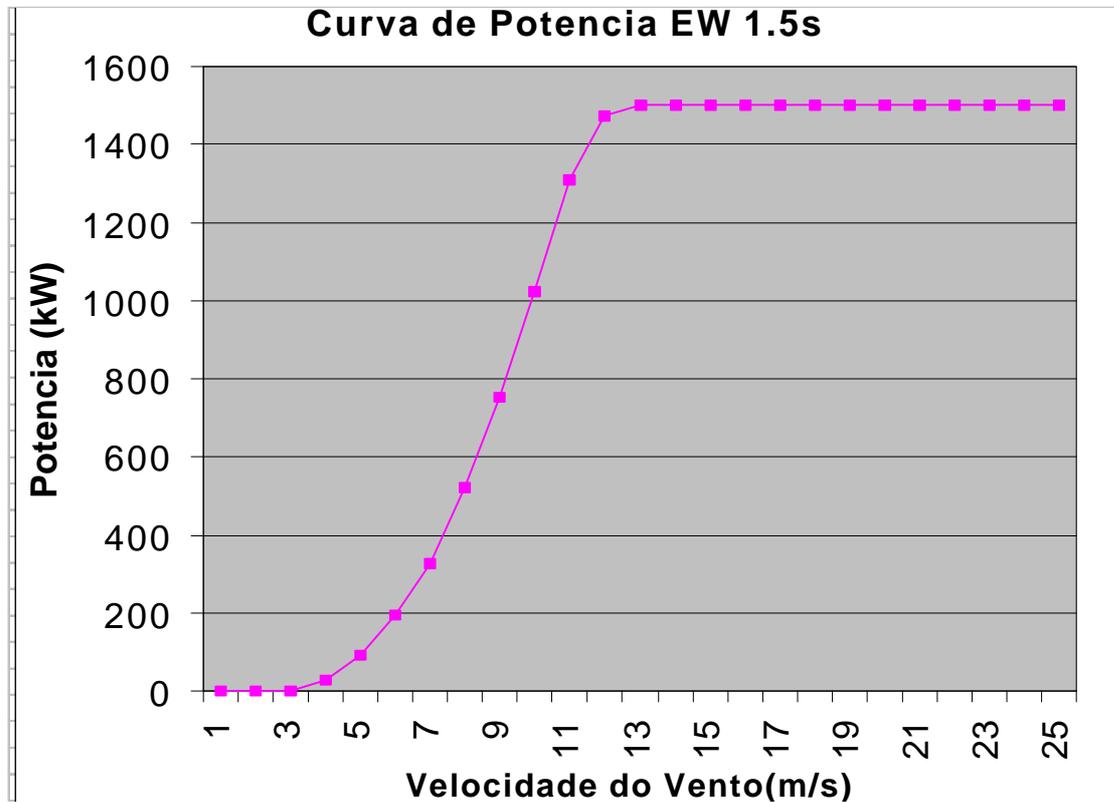


Figura 2.4 : Curva típica de Potência de uma turbina GE – Modelo EW-1.5s

A figura 2.4 apresenta uma curva típica da potência de uma turbina eólica em função da velocidade do vento.

O coeficiente  $C_p$  é uma característica intrínseca de desenho da turbina eólica, tendo como valor máximo teórico o valor de  $16/27$  ( $\sim 0,593$ ), valor conhecido como Limite de “Betz”. Tipicamente, as mais modernas turbinas eólicas apresentam valor para  $C_p$  entre 0,4 e 0,5.

A razão definida como a “velocidade específica da ponta ( **tip speed ratio**)” é dada por :

$$I = \frac{\Omega R}{v} \quad (2.4)$$

Onde,

$v$  – Velocidade específica da ponta ( adimensional)

$\Omega$  – Velocidade angular do rotor ( rad/s)

R – Raio do rotor (m)

“ $C_q$ ” é a relação adimensional dada por :

$$C_q = \frac{C_p}{I} \quad (2.5)$$

Por um sistema mecânico simples a caixa multiplicadora transfere ao eixo do gerador uma velocidade multiplicada, favorecendo baixas velocidades de vento. Mas, os problemas de manutenção, de atrito e inércia do próprio sistema geram perdas que fazem com que alguns fabricantes eliminem-nas do conjunto.

Quando uma turbina possui caixa de engrenagens, as grandezas podem ser referidas como segue :

$$\Omega_G = \Omega_T n \quad ( 2.6)$$

Onde,

$\Omega_G$  - Velocidade angular do Gerador

$\Omega_T$  - Velocidade angular da turbina

n – Constante multiplicadora da caixa

Desprezando as perdas, tem-se :  $P_G = P_T \Rightarrow T_G \Omega_G = T_T \Omega_T$  e então,

$$T_T = T_G n \quad (2.7)$$

Onde,

$T_T$  - Conjugado elétrico no lado da Turbina;

$T_G$  - Conjugado elétrico no lado do Gerador

Assim, se o momento de inércia do rotor, do lado da turbina, é  $J_T$ , pode-se escrever:

$$J_T \frac{d\Omega_T}{dt} = T_{Tres} \Rightarrow J_T \left( \frac{1}{n} \frac{d\Omega_T}{dt} \right) = n T_{Gres} \quad (2.8)$$

Substituindo a equação 2.7 em 2.8, tem-se :

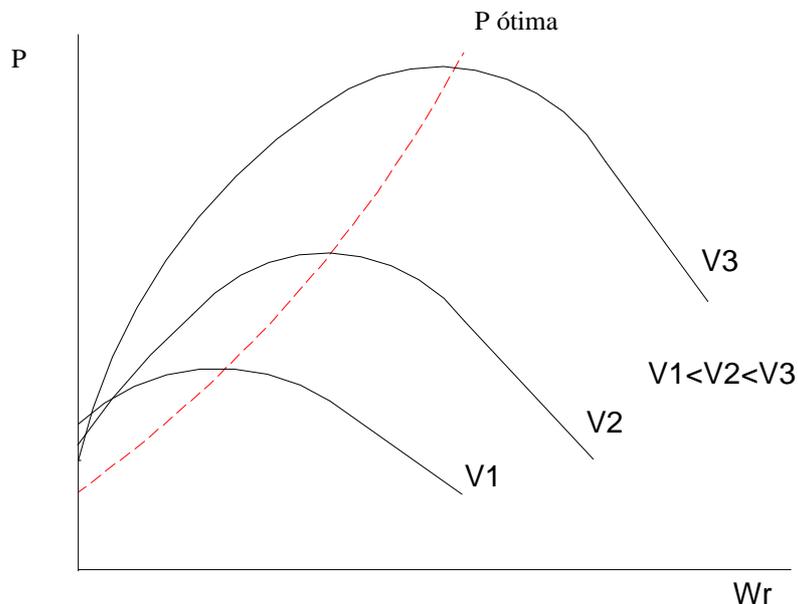
$$J_G = \frac{J_T}{n^2} \quad (2.9)$$

Onde,

$J_G$  - Constante de Inércia referida ao lado do Gerador

Dentre os dados técnicos de um equipamento, uma importante característica que pode ser aproveitada pelo controle para fazer a máquina trabalhar dentro da máxima eficiência é a curva Conjugado (T) versus Velocidade mecânica da máquina ( $w_r$ ), como exemplifica a figura 2.5.

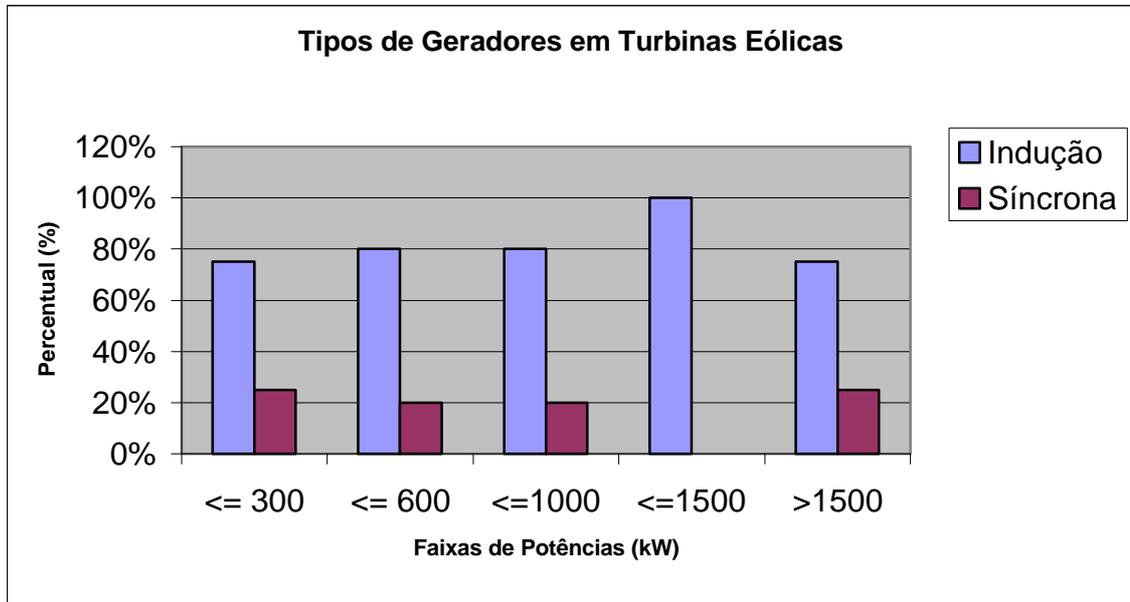
Para se fazer uso da curva, deve-se a partir de valores medidos de velocidade do vento e velocidade angular, escolher o conjugado eletromagnético a ser imposto no gerador de forma a garantir operação com a máxima potência extraível.



**Figura 2.5 : Curvas de Potência versus Velocidade de uma turbina em diferentes condições de vento**

Quanto ao gerador, no mercado ainda pode se encontrar o uso de máquinas síncronas ou assíncronas. Pelo último levantamento feito na Alemanha [Bundesverband Windenergie,2002], a maioria dos fabricantes optaram pela robustez, simplicidade, baixo custo de aquisição e manutenção da máquina de indução. Mas, mesmo utilizando esse gerador, ainda há divergências quanto ao tipo de rotor (Gaiola ou Bobinado) e às técnicas aplicadas. Há os que optaram pelo uso de máquinas com pólos variáveis, também chamadas de turbinas com dupla velocidade, favorecendo a geração a baixas velocidades [Muljadi e McKenna, 2002].

A partir de dados dos principais fabricantes de turbinas [Bundesverband Windenergie,2002], pode ser visto como as diferentes tecnologias estão divididas em algumas faixas de potência (figura 2.6).



**Figura 2.6 Tipos de geradores utilizados em Turbinas Eólicas em diferentes faixas de Potência**

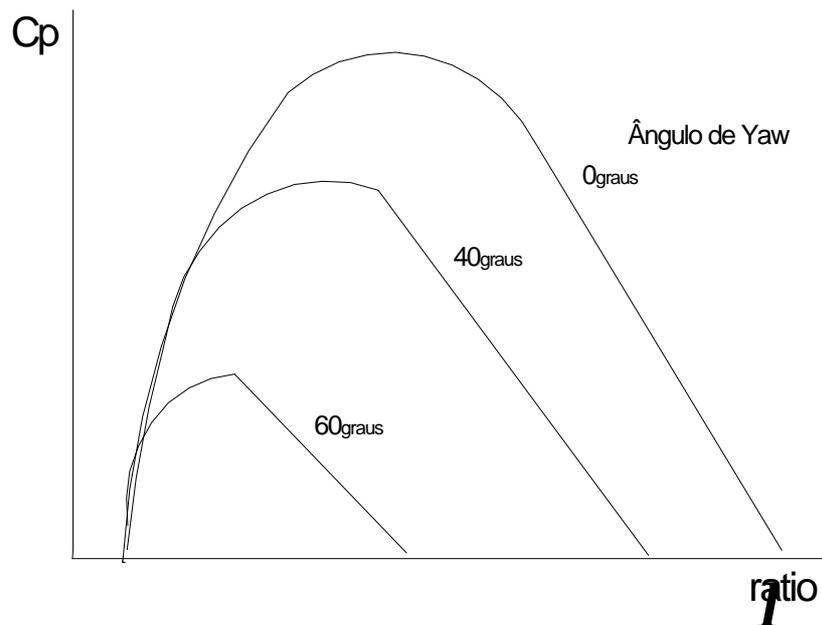
O melhor aproveitamento da energia dos ventos, ou seja, a máxima energia mecânica transferida ao eixo do gerador acoplado, é obtido geralmente com os artifícios de controle mecânico inerentes à turbina. Os artifícios disponíveis na tecnologia da eletrônica de potência têm sido difundidos no controle de sinal das máquinas, na partida e parada suaves e também no link AC-DC-AC.

Em busca da direção de maior “rajada” do vento, a turbina pode possuir um controle que faz todo o conjunto de pás girar em torno da torre, conhecido com controle de **Yaw**.

Uma turbina pode possuir pás fixas ou móveis. O controle por **Pitch** permite a rotação da pá em torno do seu eixo principal e assim regular o ângulo ótimo para

cada condição de vento. Por meio de servomecanismos, a turbina poderá controlar a velocidade e potência da máquina.

Na figura 2.7 pode-se observar o comportamento de uma turbina no controle de Yaw.



**Figura 2.7** Curvas típicas de  $C_p$  em diferentes ângulo de giro da Torre.

O controle por **Stall** mantém as pás das turbinas fixas. Então, quando a velocidade do vento ultrapassa a velocidade de projeto, ocorre uma mudança no comportamento do escoamento, passando a ser turbulento, reduzindo a potência extraída.

Em resumo, [Hanse e outros,2001] classificaram como a tecnologia das turbinas eólicas encontra-se no mercado segundo o tipo de transmissão, máquina, rotor, estator e conexão à rede, segundo os maiores fabricantes do mundo, como mostra o diagrama da figura 2.8.

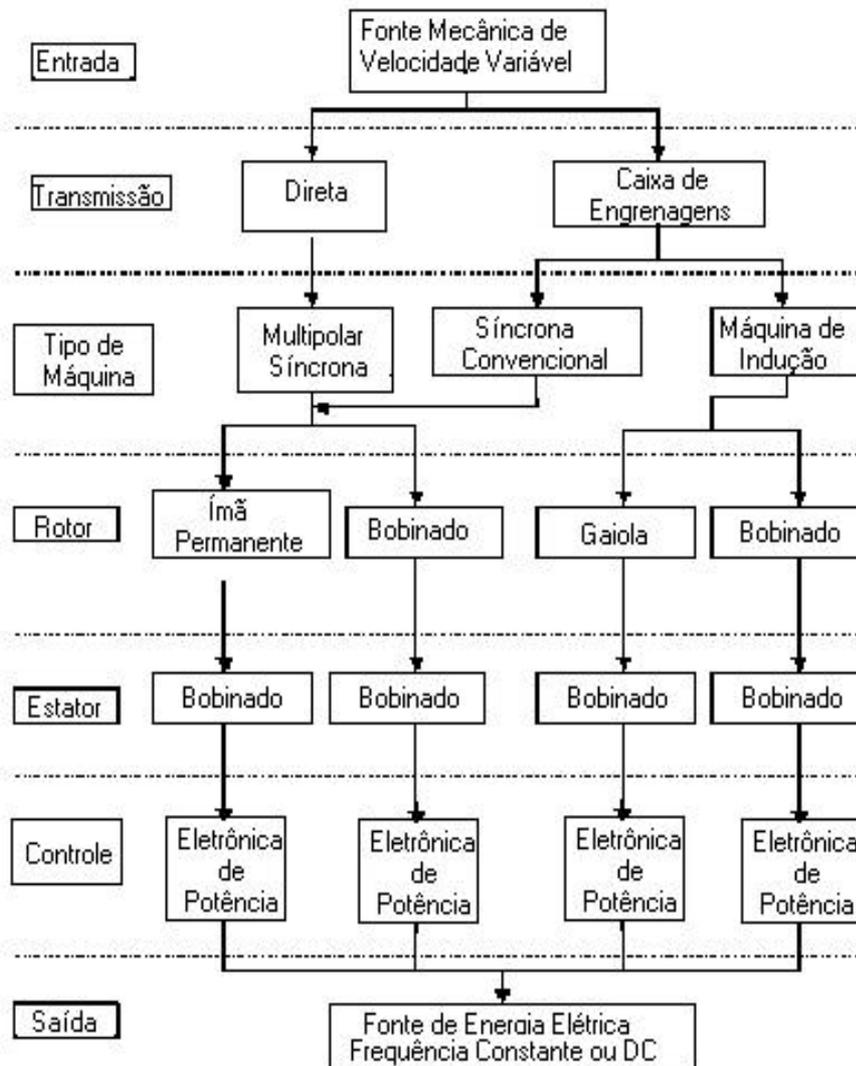


Figura 2.8 Diagrama de classificação de topologias e tecnologias de turbinas eólicas

Os efeitos causados pela passagem periódica das pás pela torre de sustentação, conhecida como sombra da torre; a aleatoriedade das direções e intensidades do vento, conhecida como turbulência; além das interrupções transitórias de vento, podem ser considerados, submetendo os controles a restrições e impondo a função objetivo na saída.

Esse trabalho investiga algoritmos de controle com o uso de um modelo de turbina eólica com gerador de indução, com controle vetorial de fluxo e conjugado e de fator de potência. Verifica-se ainda, a possibilidade de controle pelo estator ou rotor da máquina.

## 2.3 O Estado da Arte

As primeiras aplicações com utilização de turbinas eólicas foram datadas de 1891. Em 1897 foi construído na Askov Folk High School, Dinamarca, o primeiro centro de pesquisa na área do mundo [Rosas, 1997]. O estudo sobre geração de energia elétrica a partir dos ventos iniciou-se nas aplicações onde a aleatoriedade do fornecimento da fonte de energia, que interferiria na qualidade e na interrupção de atendimento, não prejudicasse aquele tipo de consumidor. As primeiras instalações procuraram atender comunidades isoladas e distantes da rede elétrica. Nas investigações, primeiramente era feito um estudo sobre as condições de captação de ventos e aí então se ajustava a turbina “ideal” a ser utilizada naquele sítio. Ou seja, qual turbina conseguiria melhor extrair potência diante da ordem de velocidades dos ventos encontradas.

[Silva,1988] analisou as aplicações da geração eólica em acionamento de moto-bombas e no carregamento de baterias. Nesse trabalho, a escolha do gerador utilizado como aplicação autônoma foi governada principalmente pelas características das cargas conectadas. Se, por exemplo, o suprimento de energia fosse para fins de bombeamento d’água, onde o controle de frequência e tensão não necessitam ser precisos, máquinas de corrente contínua ou alternadores podiam ser igualmente adequadas, levando em consideração apenas os custos. À medida em que as exigências de controle e as relações custo-desempenho da

máquina tornaram-se fatores preponderantes no projeto, as máquinas síncronas, de indução ou de ímã permanente apareceram como alternativas mais adequadas. Usando a topologia de geração isolada da rede variando apenas o tipo controle, [[Ziyad e outros, 1996] e [Chan e outros,2001] estudaram também aplicações no atendimento direto a cargas CC, ou em co-geração fotovoltaica.

Diante das condições a que os “sítios” estavam sujeitos, houve uma busca por novas soluções que se adaptassem às restrições. As primeiras grandes contribuições foram as da mecânica, que partiram com o artifício de controle do movimento da torre e depois com o das pás para melhor aproveitar as direções de vento. Com a evolução das tecnologias na eletrônica de potência mostrou-se que o gerador e o seu acionamento eram componentes do sistema de aerogeração onde poderia se interferir para se extrair melhor eficiência [Heier, 1998].

A máquina de indução, devido às suas vantajosas características construtivas, tem predominado no mercado de acionamentos elétricos. [Ekanayke, 2002], por exemplo, defende o uso dessas máquinas até para hidroelétricas de pequeno porte.

Ainda, na aplicação como gerador, a máquina de indução apresenta o inconveniente de requerer da mesma fonte elétrica, a sua magnetização e a produção de conjugado. Operando à velocidade variável requer uma fonte controlada de reativos e uma técnica de controle desta excitação que garanta fluxo constante e, conseqüentemente, alta capacidade de produção de conjugado. Contudo, em sistemas de geração eólica conectada a redes elétricas, a máquina de indução é forte favorita [Freris, 1990], como nas instalações das fazendas eólicas na Califórnia (EUA), no Brasil, no Morro do Camelinho (MG) e outras espalhadas pelo mundo [Silva, 1995].

As primeiras tentativas para controlar a potência reativa requisitada pelas turbinas eólicas foram com o uso de banco de capacitores. [Rezende e Rezek, 1997] criaram um método de controle para fornecer o reativo necessário à máquina, operando isoladamente, onde reatores associados a capacitores eram controlados por tiristores. [Ekanayke et al, 1999] estudaram um algoritmo para programar uma tensão de trabalho ótima para compensadores estáticos avançados produzindo fator de potência unitário no ponto de conexão da fazenda eólica à rede. [Barbosa e Watanabe, 2002 ] propuseram o controle da tensão do Statcom, utilizando dois conversores fonte de tensão, de tal forma que não fosse necessário carregar e descarregar o capacitor CC do inversor.

As técnicas de controle também evoluíram nos estudos dos acionamentos dessas máquinas. [Rezende e Rezek, 1997] propuseram um método de controle da tensão e frequência da tensão de saída gerada, onde um compensador estático a tiristores é usado para controlar a excitação do gerador e um conversor CA/CC/CA, com retificador a diodos e inversor a tiristores, é empregado para o controle de potência ativa gerada. Mas, já em 1993, Habetler analisava o uso de conversores totalmente controlados, que amplia as possibilidades de controle do sistema de geração, possibilitando realizar o controle de potência por meio vetorial. [Asher et al, 1996] utilizaram conversores totalmente controlados do lado do rotor e basearam as orientações pela tensão e fluxo de estator. [Miranda e outros, 1997] propuseram uma estratégia de controle para um sistema de bombeamento d'água, onde o fluxo de potência reativa necessário para as duas máquinas de indução (gerador e moto-bomba) era controlado em referencial orientado pelo fluxo de estator do gerador. [Battista e outros, 2000] analisaram um método para compensar distorções no torque eletromagnético baseados ainda no controle de um retificador a diodos e num inversor a tiristores. [Nigim et al, 2001] estudaram o controle de sinal gerado pela variação de resistências conectadas ao rotor da máquina. [Helle and Nielsen, 2001] , no mesmo ano, propuseram o uso do controle pelo rotor bobinado impondo a referência de potência ótima transferida pela turbina aos controles.

Devido à incorporação das técnicas de controle vetorial, as máquinas assíncronas já dominam o mercado dos acionamentos elétricos de alto desempenho. A maioria das técnicas de controle vetorial tem sido proposta em duas estruturas de controle distintas [Silva, 1995]: método direto e indireto de controle por orientação de campo. O primeiro se caracteriza pela realimentação do vetor fluxo magnético, necessitando da existência de sensores, estimadores ou observadores de fluxo controlado. Como não depende, idealmente, dos parâmetros do modelo da máquina é robusto à variação paramétrica, agregando ao controle de conjugado o controle direto do módulo do vetor fluxo, lhe garantindo normalmente robustez, rapidez e precisão de resposta. Vale salientar que, o uso de estimadores ou observadores de fluxo pressupõe o conhecimento desses parâmetros. Mas, o desenvolvimento de observadores pouco sensíveis a essa variação tem sido largamente estudado pelos pesquisadores da área.

O método indireto representa uma imposição do vetor fluxo, pois utiliza um modelo e parâmetros da máquina para garantir seu desempenho, não existindo informação real do fluxo controlado. Com isto, o método indireto é dependente da perfeita sintonia entre os parâmetros do modelo utilizado e o comportamento real e não-linear da máquina, onde efeitos como variação de temperatura, saturação e efeito pelicular deterioram sensivelmente o desempenho especificado.

As estratégias de controle vetorial de máquinas de indução podem ser classificadas de acordo com o mecanismo empregado para controle de conjugado [Silva, 1995] e [Neves, 1999], em controle por orientação pelo campo (FOC) e controle por aceleração de campo (FAM). Em ambos os casos, podem ser desenvolvidas estruturas em que as grandezas utilizadas para controle de fluxo e conjugado são as correntes (técnicas para alimentação em corrente) ou tensões de estator (técnicas para alimentação em tensão). As técnicas de controle por orientação pelo campo foram generalizadas em [DeDonker et al, 1988]. Uma

classificação das técnicas de controle vetorial de máquinas de indução, para alimentação em corrente ou em tensão, pode ser encontrada em [Silva, 1995].

Neste trabalho foram consideradas as técnicas com alimentação em corrente no controle dos conversores, associadas a modulação por largura de pulso do tipo Regular Trifásico Simétrico.

A grande vantagem das estratégias de controle por orientação pelo campo é que, como foram estabelecidas a partir dos modelos da máquina no sistema de coordenadas orientadas segundo o vetor fluxo controlado, permitem o desacoplamento ou quase-desacoplamento entre as malhas de controle de fluxo e conjugado [DeDoncker,1988]. As técnicas, assim, se adaptam à alimentação em corrente, uma vez que as malhas geram as componentes de referência associadas à produção de fluxo e conjugado a serem obtidas do inversor.

Nas estratégias de controle FOC para alimentação em tensão, as malhas de controle gerarão as tensões de referência a serem sintetizadas pelo conversor.

Neste trabalho, optou-se em alguns casos, pelo uso do referencial orientado pelo vetor tensão, como recurso para facilitar o desacoplamento no controle dos fluxos de potência ativa e reativa.

Para a análise de estratégias de controle com rotor bobinado, o trabalho [R. Pena e outros, 1996] deu grandes contribuições. Nesse artigo, propôs-se um método para controle de fator de potência através de conversores ligados ao rotor do gerador, considerando que a corrente de magnetização praticamente constante, já que o estator estava ligado diretamente à rede. Mais tarde, [ Datta and Ranganathan,1999] ampliaram essas propostas e descreveram métodos de controle tais que o lado do conversor ligado à rede basear-se-ia na orientação pela tensão ( $V_s$ ), impondo os fluxos de potência ativa pela corrente de eixo direto e reativa pela de eixo em quadratura. E o lado do conversor ligado à máquina seria

orientado pelo fluxo de estator girando à velocidade síncrona. Desse modo, a potência ativa seria proporcional à corrente de eixo “q” e a reativa à de eixo “d”.

Dentro do objetivo de otimizar a operação da turbina, através da imposição de conjugado que leva à máxima extração de potência, [Battista e outros, 2000], [Abdin and Xu, 2000], [Pena, 2001] e [Leidhold et al, 2002] analisaram a curva de Potência ótima versus Velocidade mecânica do Gerador como a “função objetivo” da potência ativa no controle.

Quanto às topologias, [Hanse et al, 2001] analisaram as mais comuns usando a máquina de indução conectada à rede, como pode se observar nas figuras 2.9 e 2.10.

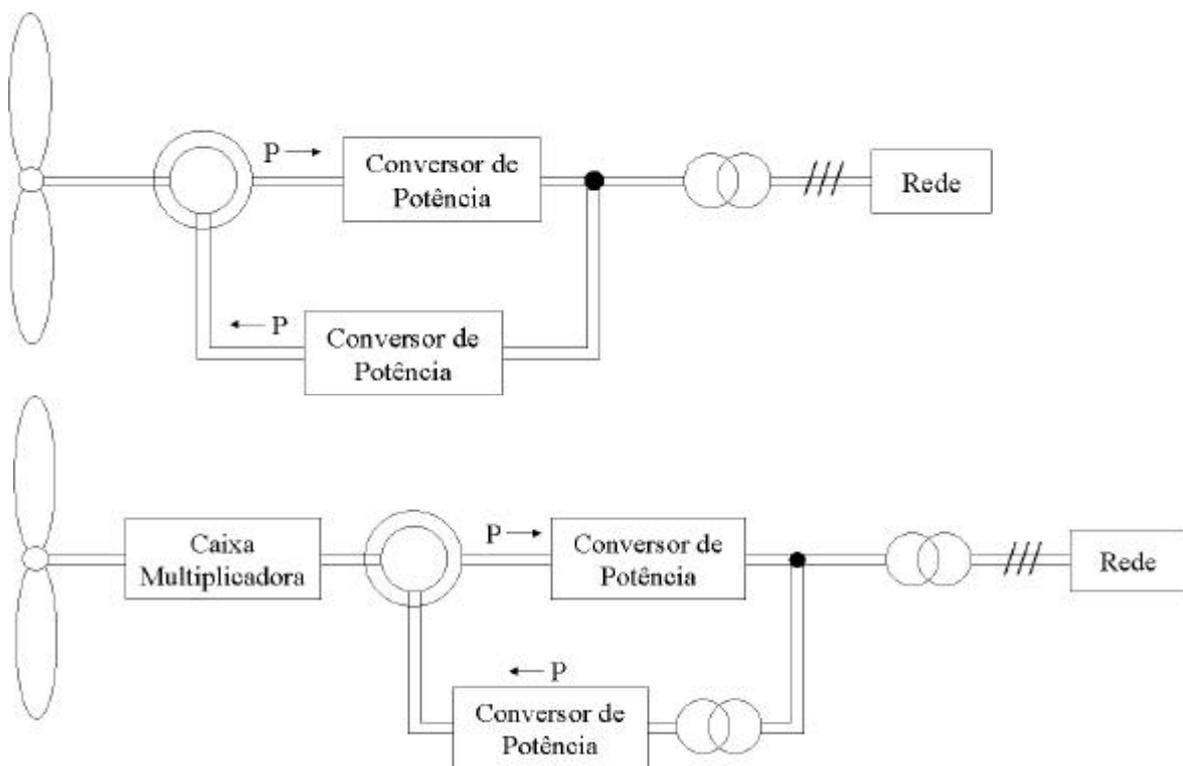
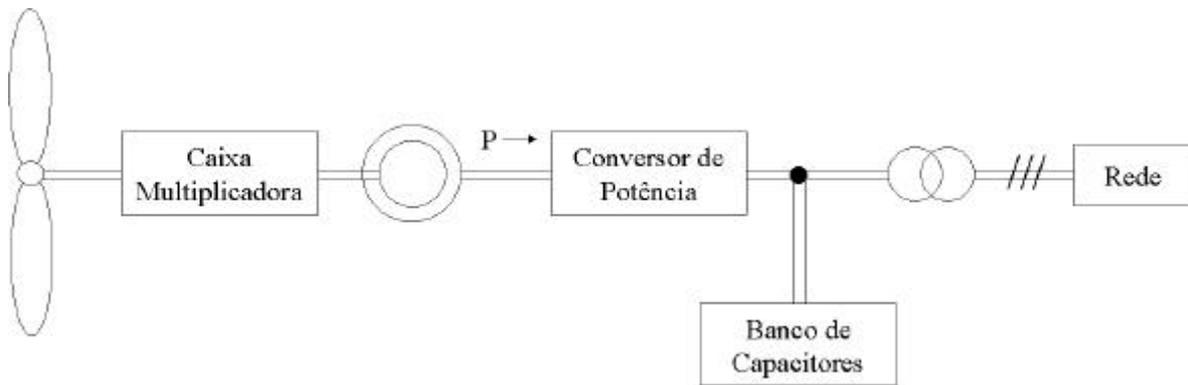


Figura 2.9 Tipos de controle em turbinas eólicas conectadas à rede duplamente alimentadas



**Figura 2.10 Diferentes controles na conexão de um gerador eólico à rede elétrica pelo estator**

[DeDoncker et al, 2002] avaliaram a viabilidade econômica das topologias exploradas com a máquina de indução, inclusive quanto ao tipo de rotor. Mesmo em desvantagens econômicas para a maioria das faixas de potência, concluíram que o gerador de indução duplamente alimentado é viável para determinadas situações. Segundo [Datta and Ranganathan, 2002], os geradores assíncronos com rotor bobinado são mais encontrados em sistemas a partir de 2 MW. Também concluíram que o seu custo é compensado pela redução da potência dos conversores. Já em [Asher et al, 1996] estudou-se a ligação de uma máquina de 7.5 kW de rotor bobinado ligado à rede elétrica. [Lakin e outros, 1999] analisaram duas máquinas de indução funcionando com os eixos acoplados, de modo a terem as características de rotor idênticas e permitirem o controle pelo estator. [Ladesma and Usaola, 2001] verificaram, num estudo comparativo de máquinas, a melhor resposta das assíncronas com rotor bobinado contra as síncronas durante quedas de tensão no sistema. Hoje, a GE fabrica Aerogeradores, como o modelo *GE Wind Energy 1.5*, com máquina de rotor bobinado com a vantagem de utilizar inversores de potência com níveis de apenas 25% da potência do gerador [GE Wind Energy, 2002].

Para entender o comportamento na partida das máquinas, sejam elas isoladas, conectadas à rede com rotor gaiola ou bobinado, foi necessário um entendimento sobre os pontos mínimos e máximos de geração da turbina. [Jangamshetti and Rau, 2001] se aprofundaram nos estudos de comportamento das turbinas diante da variação de velocidade dos ventos. Observaram como as velocidades de partida (“Cut-in”), de condições nominais e de perda de estabilidade (“Cut-out”) da máquina, limitadas pela turbina, interferiam na capacidade de potência dos sítios explorados.

A busca da confiança na injeção de cada vez maiores blocos de potência na rede e o seu total controle fez as estratégias de acionamento evoluírem junto às tecnologias disponíveis nas turbinas eólicas no sentido de controlar as necessidades instantâneas da rede.

Neste trabalho, foram analisadas três topologias e estratégias de controle, dentre as analisadas, como as mais favoráveis para uso isolado e com conexão à rede.

## Capítulo 3

### Modelagem do Sistema

Neste capítulo serão apresentadas as modelagens utilizadas para o desenvolvimento dos algoritmos de simulação, bem como para a definição das estratégias de controle.

Para o estudo de geração isolada e com conexão à rede foram utilizadas as modelagens da turbina; do gerador de indução, com rotor tipo gaiola ou tipo bobinado; e do conversor a PWM; que serão descritos a seguir.

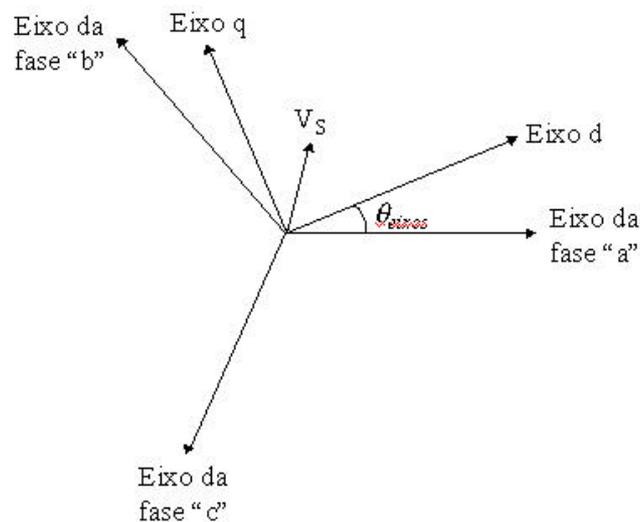
#### 3.1 Turbina Eólica

Tendo em vista que o estudo detalhado das características mecânicas da turbina foge aos objetivos deste trabalho, a mesma foi considerada nos algoritmos de simulação apenas como uma fonte primária de energia capaz de impor a velocidade mecânica ou um certo valor de conjugado de entrada. Neste último caso, levou-se em consideração, também, o momento de inércia ( $J_T$ ) do rotor da turbina, adicionando-o ao do rotor do gerador. Foi considerada ainda a característica de potência máxima extraível da turbina para determinar o conjugado eletromagnético ótimo a ser imposto pela máquina de indução.

### 3.2 Gerador de Indução

As técnicas de controle com alto desempenho para geradores de indução foram bastante simplificadas a partir da modelagem vetorial dessas máquinas.

Nas equações da máquina descritas neste trabalho, o referencial dq foi baseado como no modelo da Figura 3.1, considerando a inexistência da componente de seqüência zero.



**Figura 3.1 :** Sistema de coordenadas dq girante a uma velocidade arbitrária, sendo  $\theta_{\text{eixos}}$  o ângulo entre o eixo “d” e a fase “a”.

As equações de tensão e enlace de fluxo da máquina de indução, funcionando como motor, referidas ao estator, em referencial dq arbitrário, são:

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{I}_s}{dt} + j\omega_{\text{eixos}} \vec{I}_s \quad (3.1)$$

$$\vec{v}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{l}_r}{dt} + j(\omega_{eixos} - \omega_r) \vec{I}_r \quad (3.2)$$

$$\vec{I}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (3.3)$$

$$\vec{I}_r = L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s \quad (3.4)$$

$$T_e = \frac{3P L_m}{2 L_r} (\mathbf{l}_{rd} \mathbf{j}_{sq} - \mathbf{l}_{rd} \mathbf{j}_{sd}) \quad (3.5)$$

$$\frac{2J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{prim} - \frac{2B}{P} \omega_r \quad (3.6)$$

Onde,

$\vec{v}_s$  = Vetor espacial tensão do estator;

$\vec{v}_r$  = Vetor espacial tensão do rotor;

$R_s$  = Resistência do enrolamento de estator;

$R_r$  = Resistência do enrolamento de rotor;

$\vec{i}_s$  = Vetor espacial corrente de estator;

$\vec{i}_r$  = Vetor espacial corrente de rotor;

$\vec{I}_s$  = Vetor espacial fluxo do estator;

$\vec{I}_r$  = Vetor espacial fluxo do rotor;

$L_m$  = Indutância mútua;

$L_s$  = Indutância própria do enrolamento de estator (  $L_s + L_m$  );

$L_r$  = Indutância equivalente do enrolamento de rotor (  $L_r + L_m$  );

$\omega_{eixos}$  = Velocidade do sistema de coordenadas dq;

$\omega_r$  = Velocidade do rotor, em radianos elétricos por segundo;

J = Momento de inércia do rotor da máquina acoplado ao da turbina;

P = Número de pólos da máquina;

B = Coeficiente de atrito viscoso.

Algumas grandezas, afetadas pelo sentido de funcionamento da máquina, como, por exemplo : correntes (i), conjugados(T) e fluxos de potência (Q e P), serão negativas quando do funcionamento como gerador.

Para a conversão dos sistemas foram usadas as matrizes de transformação, considerando a inexistência de componentes homopolares :

abc  $\implies$  dq :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \mathbf{q}_{eixos} & \cos(\mathbf{q}_{eixos} - 120^\circ) & \cos(\mathbf{q}_{eixos} + 120^\circ) \\ -\text{sen} \mathbf{q}_{eixos} & -\text{sen}(\mathbf{q}_{eixos} - 120^\circ) & -\text{sen}(\mathbf{q}_{eixos} + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}; \quad (3.7)$$

dq  $\implies$  abc:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{q}_{eixos} & -\text{sen} \mathbf{q}_{eixos} \\ \cos(\mathbf{q}_{eixos} - 120^\circ) & -\text{sen}(\mathbf{q}_{eixos} - 120^\circ) \\ \cos(\mathbf{q}_{eixos} + 120^\circ) & -\text{sen}(\mathbf{q}_{eixos} + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}; \quad (3.8)$$

As grandezas do rotor, das equações equações 3.1 a 3.6, estão referidas ao estator através de fatores de multiplicação baseados no número de espiras dos seus enrolamentos de rotor ( $N_r$ ) e estator ( $N_s$ ).

Para o desenvolvimento dos algoritmos de simulação em MATLAB, as equações do modelo eletromagnético da máquina, equações 3.1 a 3.6, foram rescritas na forma de equação de estado e discretizadas pela função **c2d**. Considere-se, por exemplo, um sistema contínuo com equação de estado dada por :

$$\frac{dX}{dt} = A.X + B.U \quad (3.9)$$

de modo que, suas grandezas são avaliadas pela forma :

$$\frac{dX}{dt} = A.X + B.U \quad (3.10)$$

Onde,

X é o vetor de estado;

U é o vetor de entrada do sistema;

A e B são matrizes com dimensões apropriadas.

O sistema acima pode ser discretizado, com um intervalo de amostragem  $T_{\text{amost}}$  usando-se o comando :

$$[A_d, B_d] = c2d[A, B, T_{\text{amost}}] \quad (3.11)$$

sendo obtidas as matrizes  $A_d$  e  $B_d$  correspondentes do modelo discreto :

$$X_{K+1} = A_d.X_K + B_d.U \quad (3.12)$$

Sendo os índices k e k+1 associados à k-ésima e (k+1)-ésima amostragens, respectivamente.

Vale salientar que a matriz de estados do modelo da máquina de indução contém termos que dependem da velocidade rotórica. Porém, como a velocidade varia muito lentamente, em comparação com o intervalo de amostragem necessário para simular as grandezas elétricas e magnéticas, é razoável considerá-la

constante em cada intervalo de amostragem. Deve-se no entanto, utilizar a função **c2d** a cada amostragem.

### 3.3 Conversores

Os conversores utilizados são compostos de um sistema com seis chaves controladas. A Figura 3.2 apresenta um conversor trifásico do tipo CC - CA. Cada uma das chaves mostradas representa um IGBT com um diodo de roda livre em anti-paralelo. O conversor é acionado de forma que os estados das chaves de um mesmo braço sejam complementares.

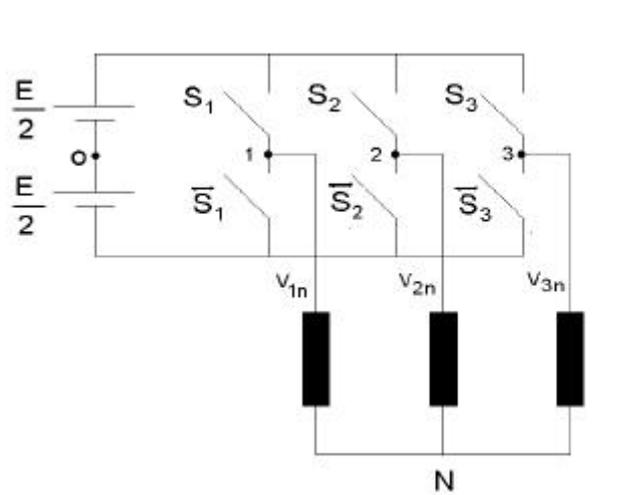


Figura 3.2 Diagrama básico de um conversor trifásico

Onde,

- $V_{1n}$ ,  $V_{2n}$  e  $V_{3n}$  são as tensões de fase sintetizadas pelo conversor;
- $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  são as chaves a IGBT, sendo  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  as chaves em estado conjugado às primeiras;
- “E” é a tensão do barramento CC.

Nos algoritmos de simulação desenvolvidos, supõe-se que a tensão no barramento CC é conhecida e as chaves foram consideradas ideais, desprezando-se a queda de tensão nas mesmas e o tempo morto.

### **3.4 Modulação por Largura de Pulso (PWM) : Regular Trifásico Simétrico [Seixas, 1988]**

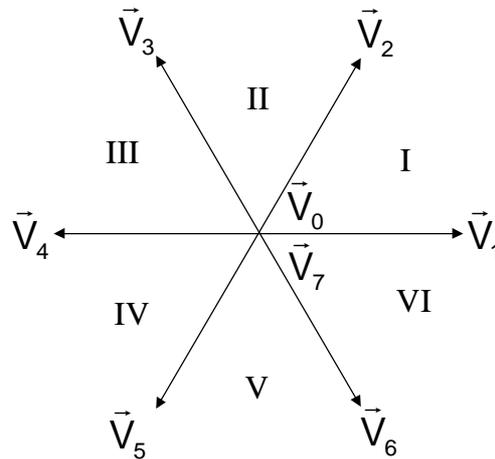
O método de modulação por largura de pulso (PWM) se baseia no reconhecimento dos 8 possíveis estados para as chaves do conversor. Cada um destes estados define um vetor tensão que pode ser aplicado, sendo que, destes 8 vetores, 6 são chamados de vetores ativos enquanto que 2 destes são chamados de vetores nulos. A tabela 3.1 mostra qual deve ser o estado de cada uma das seis chaves para a geração desses 8 possíveis vetores tensão.

<b>Vetor</b>	<b>S<sub>3</sub></b>	<b>S<sub>2</sub></b>	<b>S<sub>1</sub></b>
V <sub>0</sub>	0	0	0
V <sub>1</sub>	0	0	1
V <sub>2</sub>	0	1	1
V <sub>3</sub>	0	1	0
V <sub>4</sub>	1	1	0
V <sub>5</sub>	1	0	0
V <sub>6</sub>	1	0	1
V <sub>7</sub>	1	1	1

**Tabela 3.1 Estados das chaves do conversor para cada vetor aplicado**

A convenção usada para as chaves (se 0 ou 1) é que se  $S_1 = 1$ , então, significa dizer que a chave superior do braço  $S_1$  está fechada enquanto que a chave inferior desse mesmo braço está aberta. Se  $S_1 = 0$ , então a chave superior está aberta enquanto que a chave inferior está fechada.

Os vetores tensão mostrados na tabela 3.1 podem ser representados no plano  $\alpha\beta$  como indicado na figura 3.3. A amplitude de cada vetor ativo é  $2E/3$ .



**Figura 3.3 Vetores sintetizados pelo conversor trifásico de dois níveis**

Qualquer vetor tensão situado no interior do hexágono, cujos vértices são definidos pelas extremidades dos vetores ativos; pode ser obtido através da combinação de dois vetores mostrados na figura 3.3. Esse vetor tensão será uma “média ponderada” entre os dois vetores que limitam o setor ao qual o vetor tensão desejado se encontra. Os pesos dessa “média ponderada” são as razões cíclicas em que cada vetor permanecerá sendo aplicado durante o período de chaveamento ( $T_s$ ).

No método PWM regular trifásico simétrico determina-se a partir de equações algébricas simples, o tempo em que cada chave permanecerá ligada para, em termos médios, ter-se na saída o vetor desejado, a cada intervalo de chaveamento.

As malhas de controle geram as referências de tensão a serem reproduzidas pelo conversor e, então, calculam-se as razões cíclicas de cada fase do conversor.

Sejam as tensões instantâneas :

$$\begin{bmatrix} v_{1n}(t) \\ v_{2n}(t) \\ v_{3n}(t) \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_3(t) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

No K-ésimo período de chaveamento, os valores médios das tensões serão:

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_{1n}(t) \\ \bar{v}_{2n}(t) \\ \bar{v}_{3n}(t) \end{bmatrix} = \frac{E}{3T_s} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

O sistema de equações acima apresenta infinitas soluções. Porém, impondo-se uma das razões cíclicas, as demais podem ser unicamente determinadas.

Mostra-se facilmente que, se os pulsos de comando de chaves forem centralizados nos períodos de chaveamento e os intervalos de aplicação dos vetores nulos forem distribuídos uniformemente no início e no final de cada intervalo de chaveamento, como indicado na figura 3.4, tem-se :

$$t_{\min}(k) + t_{\max}(k) = T_s \quad (3.15)$$

Sejam as tensões de referência ordenadas da seguinte forma:

$$\bar{V}_{n\max} > \bar{V}_{n\text{med}} > \bar{V}_{n\min} \quad (3.16)$$

correspondentes a

$$\tau_{\max}(k) > \tau_{\text{med}}(k) > \tau_{\min}(k) \quad (3.17)$$

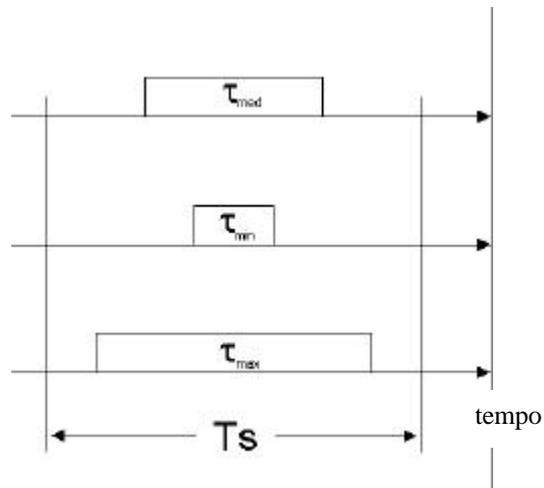


Figura 3.4 Representação gráfica das razões cíclicas de um PWM

Da equação 3.15, tem-se:

$$\bar{V}_{\text{med}} = \frac{E}{3T_s} [2t_{\text{med}} - T_s] \Rightarrow \quad (3.18)$$

$$2t_{\text{med}} - T_s = \frac{3T_s}{E} \bar{V}_{\text{med}}$$

Portanto, a fim de satisfazer as condições de simetria, deve-se ter :

$$t_{\text{med}}(k) = \frac{T_s}{2} + \frac{3T_s}{2E} \bar{V}_{\text{med}}(k) \quad (3.19)$$

Ainda da equação 3.15:

$$\bar{V}_{\text{min}} = \frac{E}{3T_s} [2t_{\text{min}} - (t_{\text{med}} + t_{\text{max}})] \quad (3.20)$$

$$\bar{V}_{\text{max}} = \frac{E}{3T_s} [2t_{\text{max}} - (t_{\text{med}} + t_{\text{min}})]$$

Das equações 3.19 e 3.20 , tem-se :

$$\Rightarrow \begin{cases} \tau_{\min}(k) = \tau_{\text{med}}(k) - \frac{T_s}{E} \bar{V}_{\text{med}}(k) + \frac{T_s}{E} \bar{V}_{\min}(k) \\ \tau_{\max}(k) = \tau_{\text{med}}(k) - \frac{T_s}{E} \bar{V}_{\text{med}}(k) + \frac{T_s}{E} \bar{V}_{\max}(k) \end{cases} \quad (3.21)$$

A técnica pode, então, ser implementada através de um algoritmo bastante simples . Inicialmente determina-se qual das três tensões tem o valor médio; depois calcula-se o  $t_{\text{med}}$  e por fim calcula-se as razões cíclicas como segue :

$$\begin{cases} \tau_1(k) = \tau_{\text{med}}(k) - \frac{T_s}{E} \bar{V}_{\text{med}}(k) + \frac{T_s}{E} \bar{V}_{n1}(k) \\ \tau_2(k) = \tau_{\text{med}}(k) - \frac{T_s}{E} \bar{V}_{\text{med}}(k) + \frac{T_s}{E} \bar{V}_{n2}(k) \\ \tau_3(k) = \tau_{\text{med}}(k) - \frac{T_s}{E} \bar{V}_{\text{med}}(k) + \frac{T_s}{E} \bar{V}_{n3}(k) \end{cases} \quad (3.22)$$

## Capítulo 4

### Sistema de Geração Isolado da Rede Elétrica

Pode-se encontrar em uso diversas topologias para geração a velocidade variável, como analisado em [Hanse et al, 2001]. Este trabalho estudou e avaliou o controle para três formas otimizadas de gerar com máquinas de indução.

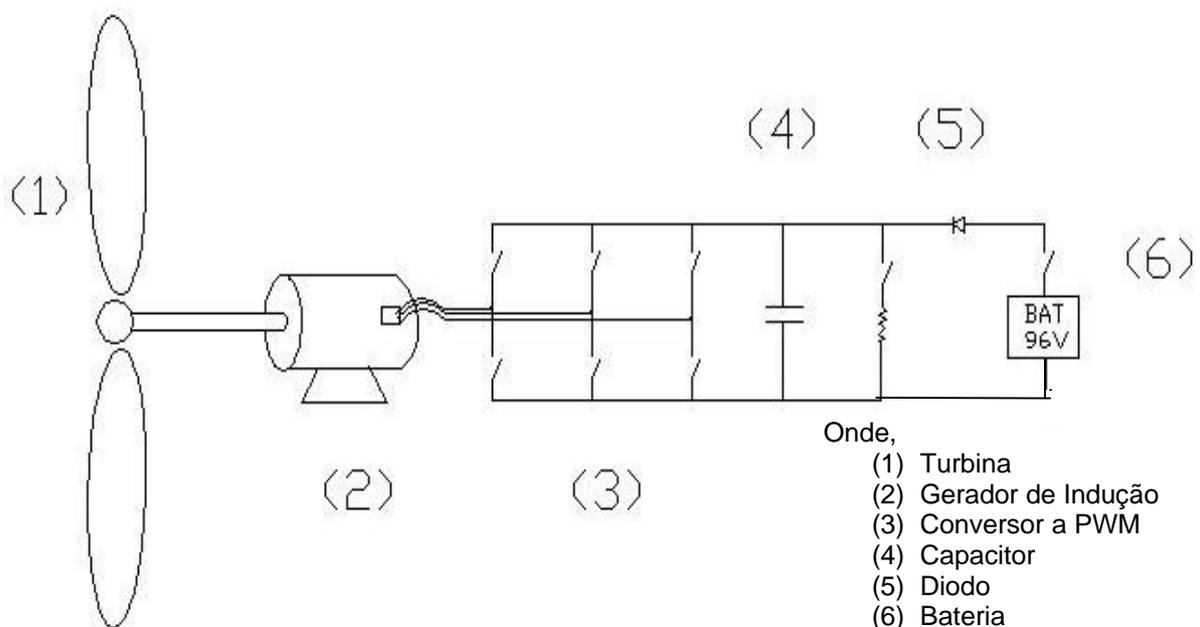
Foi investigado o uso de gerador de indução com rotor tipo gaiola em duas situações: isolado para atender uma carga CC e ligado à rede. Também foi avaliado, o uso do gerador de indução com rotor bobinado ligado à rede elétrica.

Para cada caso, foram analisadas as condições de partida da máquina, as restrições para o carregamento do banco de capacitores do elo CA-CC e o comportamento do controle diante de transitórios impostos, como: cargas, e variação de velocidade. Foi considerado no controle, a característica de máximo aproveitamento da turbina.

Neste capítulo, descreve-se a topologia e o controle de um sistema de geração isolado da rede elétrica. As outras duas alternativas estudadas, em que se considera o gerador conectado à rede elétrica são apresentadas no próximo capítulo.

## 4.1 Descrição do Sistema

Esta topologia é composta de um gerador de indução (GI) acionado por uma máquina primária de velocidade variável (turbina eólica) e ligado através de um conversor a IGBT's a um banco de capacitores (figura 4.1). Para a partida, é utilizada uma bateria, necessária para manter a magnetização da máquina, mesmo com a turbina parada. Esse banco de capacitores deverá alimentar uma carga CC, que neste caso foi representada por uma resistência.



**Figura 4.1** Esquema de ligação isolada da rede elétrica de um gerador de indução acionado por uma turbina eólica

Foi, então, elaborado um algoritmo de controle para que o conversor fosse utilizado como inversor durante a magnetização da máquina sustentada pela bateria e como retificador quando da absorção pela carga de potência gerada.

O grande obstáculo do sistema isolado se encontra na inicialização do seu funcionamento. O crescimento da tensão do elo CC, imprescindível para o controle das correntes da máquina, é obtido pelo fornecimento de potência ativa pelo próprio GI.

A figura 4.2 mostra o diagrama de blocos do controle do sistema.

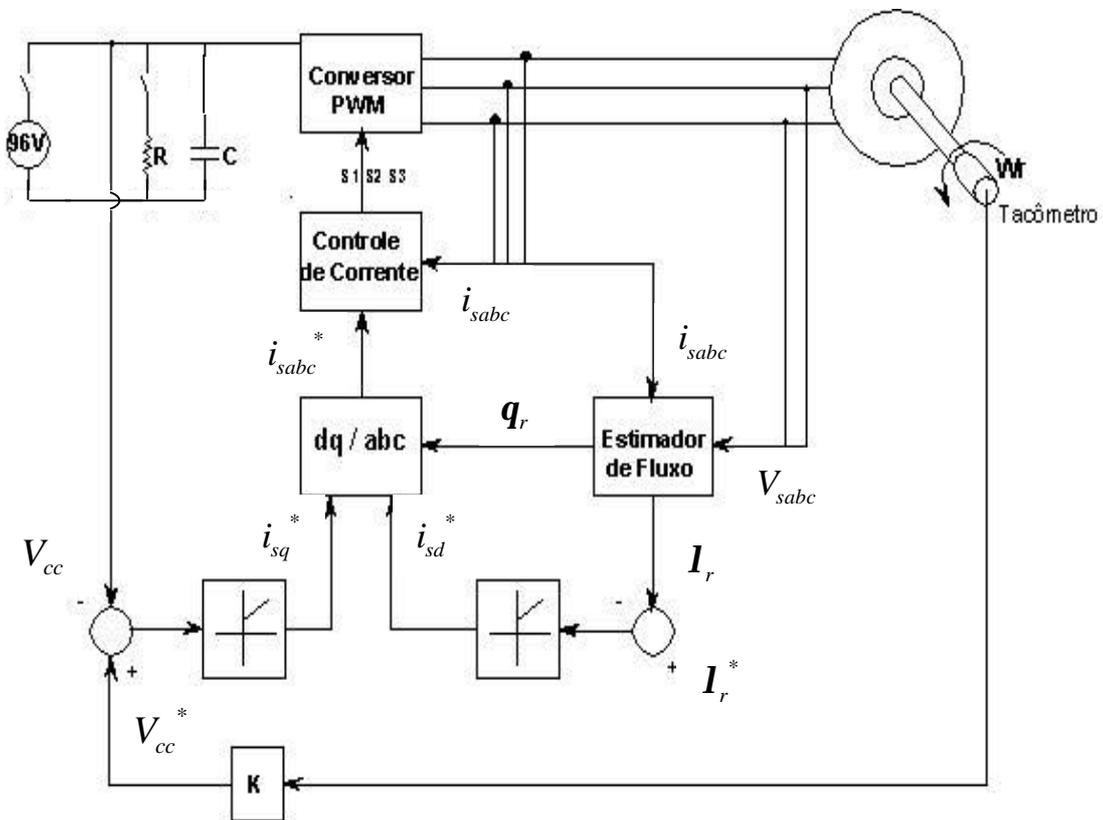


Figura 4.2 Esquema de controle do gerador de indução isolado da rede

Já na modelagem da máquina, algumas considerações foram feitas para facilitar o algoritmo de controle. Já nas equações mecânicas da máquina, na constante de

inércia “ $J$ ” foi considerada a existência do conjunto turbina-gerador adicionando-se “ $J_t$ ”, da turbina.

No esquema analisado, o elemento diodo foi adicionado para garantir uma tensão mínima ao barramento e possibilitar a magnetização da máquina.

Algumas particularidades observadas, relatadas a seguir, interferiram no desempenho dos controles .

Primeiro, considerando que, estando a máquina inicialmente desmagnetizada, independentemente da velocidade, a força contra-eletromotriz ( $f_{cem}$ ) é nula. No entanto, com o aumento do fluxo, a  $f_{cem}$  aumenta. Assim, caso a tensão do barramento cc fosse mantida constante no período de magnetização, a diferença entre a tensão do barramento CC e a  $f_{cem}$ , necessária para impor a componente de corrente para produção de fluxo pode ser insuficiente, a partir de um certo instante.

Segundo, o controle de tensão do barramento cc é realizado pela imposição de conjugado eletromagnético negativo (considerando velocidade positiva), tornando a potência ativa consumida negativa. Porém, é necessário garantir que a potência mecânica disponível seja suficiente para carregar o barramento cc, já tendo sido descontadas as perdas. Como a potência mecânica disponível depende da velocidade, é necessário que a velocidade esteja acima de um certo limite para permitir a carga do barramento cc.

Em vista das condições de partida da geração no uso isolado, observou-se que com cerca de 1/3 da velocidade síncrona consegue-se carregar o barramento CC. Esse ponto seria conhecido como o “cut in” da máquina.

Para a determinação do fluxo foi utilizado um estimador baseado no modelo em corrente. Utilizando referencial arbitrário, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{rd} \\ \mathbf{i}_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\mathbf{t}_r} & (\mathbf{w}_{eixos} - \mathbf{w}_r) \\ -(\mathbf{w}_{eixos} - \mathbf{w}_r) & -\frac{1}{\mathbf{t}_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{rd} \\ \mathbf{l}_{rq} \end{bmatrix} + \frac{L_m}{\mathbf{t}_r} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

A fim de evitar problemas numéricos, a equação acima foi implementada em referencial fixo no rotor :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{rd} \\ \mathbf{i}_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\mathbf{t}_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\mathbf{t}_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{rd} \\ \mathbf{l}_{rq} \end{bmatrix} + \frac{L_m}{\mathbf{t}_r} \begin{bmatrix} i_{salfa} \cos \mathbf{q}_r + i_{sbeta} \sin \mathbf{q}_r \\ (i_{sbeta} \cos \mathbf{q}_r - i_{salfa} \sin \mathbf{q}_r) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Onde,

$$\begin{aligned} i_{salfa} &= i_d \cos \mathbf{q}_r \\ i_{sbeta} &= i_d \sin \mathbf{q}_r \end{aligned} \quad (4.3), (4.4)$$

Uma vez determinadas as componentes do vetor fluxo, a partir da equação acima discretizada, o vetor fluxo em referencial estacionário é obtido:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{l}_{ra} \\ \mathbf{l}_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{rd} \cos \mathbf{q}_r - \mathbf{l}_{rq} \sin \mathbf{q}_r \\ \mathbf{l}_{rq} \cos \mathbf{q}_r + \mathbf{l}_{rd} \sin \mathbf{q}_r \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

No diagrama da figura 4.2 são apresentadas as malhas de controle usadas para conversor : incluindo a de tensão do banco de capacitores ( $V_{cc}$ ) e de Fluxo de Rotor ( $\mathbf{l}_r$ ).

Nas equações 4.6 a 4.8, nas quais foi empregado referencial orientado pelo fluxo de rotor, observa-se a dependência entre o fluxo e a componente de eixo direto da corrente de estator. Assim :

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\mathbf{l}_{rd}}{dt} \quad (4.6)$$

A partir das equações da máquina, podemos escrever ainda :

$$v_{rd} = 0 = R_r \left( \frac{\mathbf{l}_{rd}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{sd} \right) + \frac{d\mathbf{l}_{rd}}{dt} \quad (4.7)$$

e então :

$$\frac{d\mathbf{l}_{rd}}{dt} + \frac{\mathbf{l}_{rd}}{t_r} = -\frac{L_m}{t_r} i_{sd} \quad (4.8)$$

Assim, é natural que a saída do controlador de fluxo seja a componente da corrente de referência do eixo “d” denominada de “ $i_{sd}^*$ ”.

Para o controle da tensão do barramento CC, deve-se procurar impor valores adequados à corrente do capacitor  $I_{cc}$ . Tal corrente é igual a componente fornecida pelo conversor ao barramento CC menos a corrente de carga. Assim, tem-se:

$$I_{cc} = C \frac{dv_{cc}}{dt} = i_{conv} - i_{carga} \quad (4.9)$$

Desconsiderando as perdas da máquina, pode-se escrever que :

$$v_{cc} i_{conv} = P_{gerada} = -\frac{2}{P} \mathbf{w}_r T_e \quad (4.10)$$

Onde  $P$  é o número de pólos da máquina. E, então:

$$i_{conv} = -\frac{2}{P} \frac{\mathbf{w}_r}{v_{cc}} T_e \quad (4.11)$$

Portanto,

$$C \frac{dv_{cc}}{dt} = -\frac{2}{P} \frac{\mathbf{w}_r}{v_{cc}} T_e - i_{carga} \quad (4.12)$$

Pela equação acima, observa-se que a imposição de um valor adequado de conjugado, possibilita o controle da tensão do barramento CC.

O conjugado eletromagnético em função do fluxo de rotor e corrente de estator é:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \text{Im} \left\{ \hat{\mathbf{i}}_s^* \mathbf{I}_r \right\} \quad (4.13)$$

Onde  $\mathbf{I}_r^*$  é o conjugado de  $\mathbf{I}_r$ .

Em referencial orientado pelo fluxo de rotor, ou seja, fazendo  $\mathbf{I}_{rq} = 0$ , tem-se:

$$T_e = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \mathbf{I}_{rd} i_{sq} \quad (4.14)$$

Assim, a corrente de referência de eixo em quadratura é :

$$i_{sq}^* = \frac{1}{L_r} \frac{T_e^*}{0.75 P L_m |\hat{\mathbf{I}}_r|} \quad (4.15)$$

Como a corrente acima é proporcional ao conjugado de referência, a constante de proporcionalidade pode ser incorporada aos ganhos do controlador de tensão do

barramento CC, sendo desnecessário um controlador específico para o conjugado eletromagnético.

Para garantir um bom desempenho dos controladores descritos é ainda necessário realizar o controle das correntes de estator de modo a impor os valores de referência de eixos d e q. O controle das correntes será realizado também em referencial orientado pelo fluxo de rotor, conforme indicado na figura 4.4.

Como as grandezas controladas estão representadas por suas componentes contínuas, d e q, torna-se viável a opção pelos controladores do tipo PI. Vale salientar que, em todos os casos estudados, os ajustes dos ganhos foram feitos de forma empírica, merecendo uma atenção maior no futuro, como possibilidade de melhoria dos resultados.

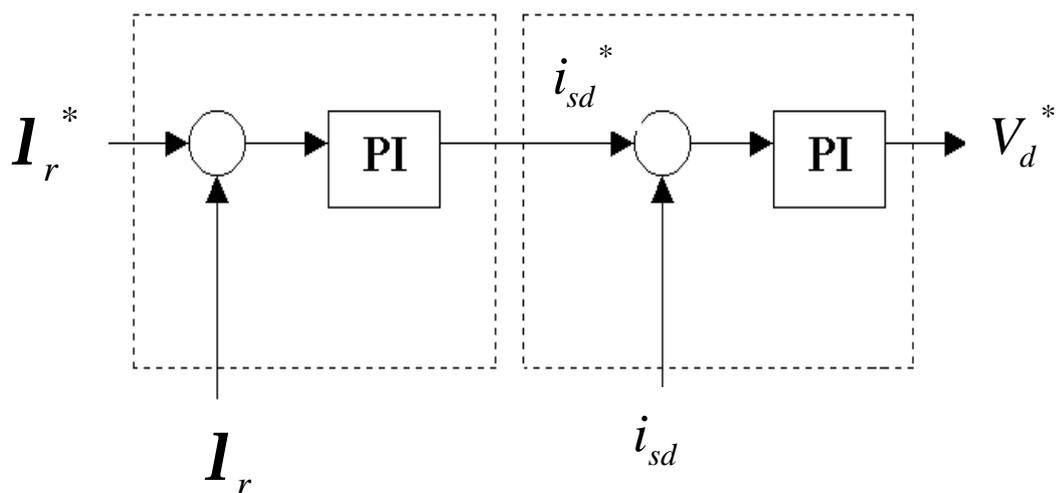
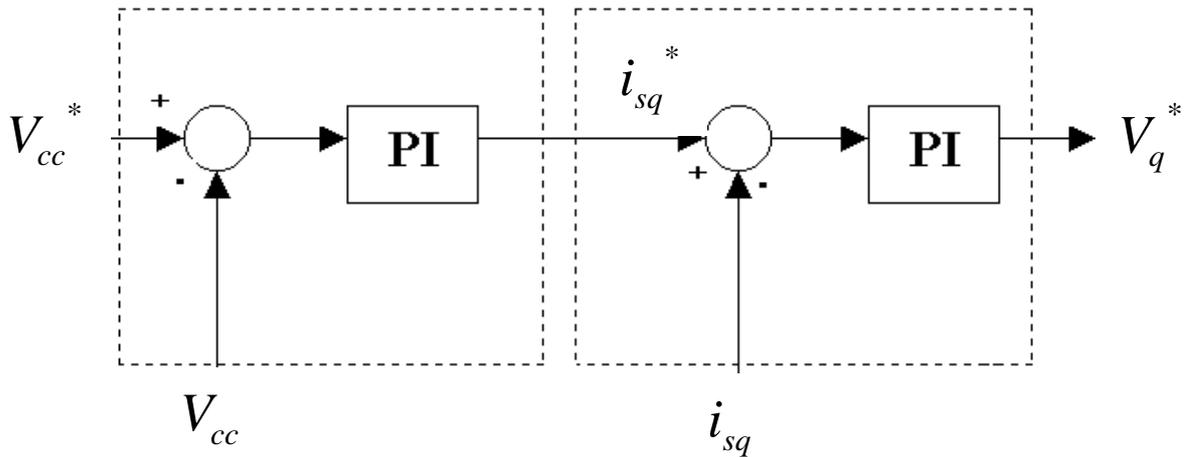


Figura 4.3 Malha de controle de fluxo de rotor de gerador isolado da rede elétrica.



**Figura 4.4** Malha de controle de tensão do barramento CC do sistema isolado da rede elétrica.

Nas malhas citadas, as tensões de saída de referência estão em referencial orientado, tornando necessário realizar uma transformação para se determinar as componentes abc de referência. Estas irão ser sintetizadas pelo conversor a partir da técnica PWM.

As equações que descrevem as relações tensão-corrente, em referencial orientado, são:

$$V_{sd} = \left( R_s + \frac{L_m^2}{t_r L_r} \right) i_{sd} + s L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_{eixos} s L_s i_{sq} - \frac{1}{t_r} \frac{L_m}{L_r} I_{rd} \quad (4.16)$$

e

$$V_{sq} = \left( R_s + \frac{L_m^2}{t_r L_r} \right) i_{sq} + s L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_{eixos} s L_s i_{sd} + \omega_r \frac{L_m}{L_r} I_{rd} \quad (4.17)$$

## **4.2 Estratégias e análise dos resultados**

Neste capítulo são apresentados resultados de simulação e experimentais. Os dois métodos de análise se basearam nas mesmas estratégias de inicialização, técnicas de controle e imposição de velocidade primária, diferindo apenas dos meios utilizados para aquisição de dados. Assim, serão apresentadas as estratégias utilizadas e posteriormente serão comparados os resultados.

A primeira etapa foi o desenvolvimento do algoritmo de simulação em linguagem C, a fim de verificar a viabilidade da implementação das estratégias de controle escolhidas e determinar os ajustes iniciais dos controladores.

Ajustado o caso, partiu-se para a montagem, onde foram confirmados os resultados da simulação. A bancada de ensaios utilizada está representada no esquema da figura 4.5.

O varivolt juntamente com o retificador, simula o banco de baterias. As placas de aquisição de dados e de PWM fazem a interface entre o computador e o sistema físico. O motor CC simula a variação de velocidade imposta ao eixo, similarmente à turbina eólica. No computador realiza-se o algoritmo de controle em tempo real.

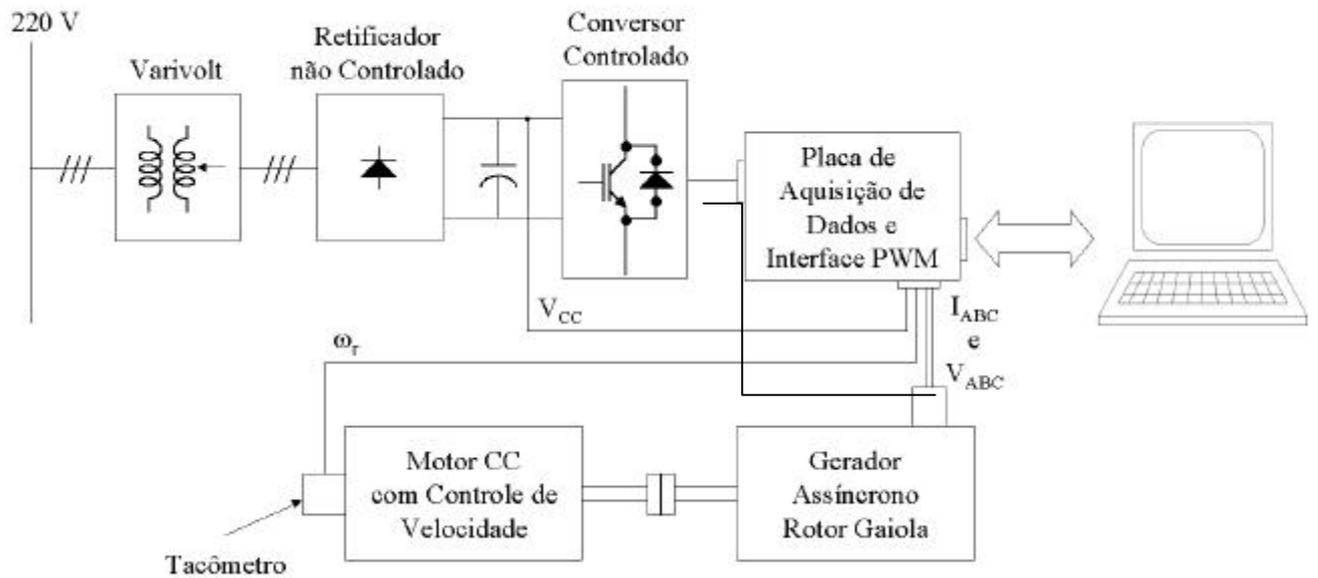


Figura 4.5 Esquema da bancada de ensaios de acionamento de gerador de indução acionado em velocidade variável

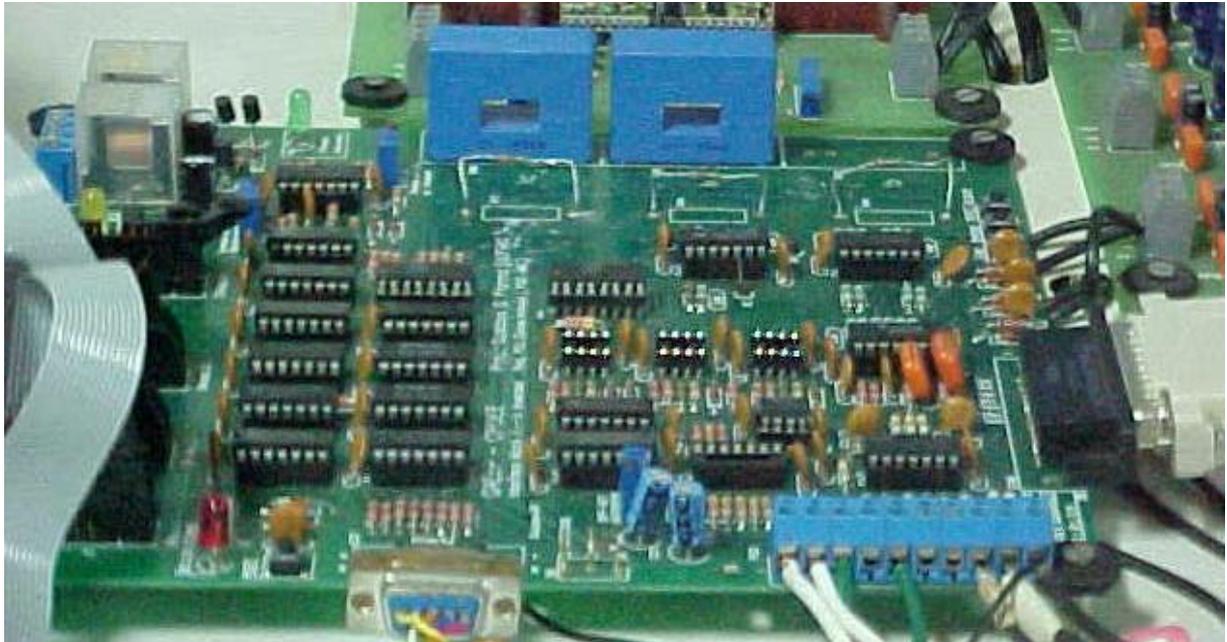


Figura 4.6 Placa de condicionamento de sinais utilizada na bancada de ensaios do gerador isolado.

Para a realização dos ensaios do presente trabalho, são utilizados quatro canais de entrada, para a aquisição dos sinais de corrente de duas fases (através de sensores de efeito hall), da tensão do barramento CC e do sinal de velocidade, proveniente do tacogerador CC.

Tanto na simulação como na montagem foi utilizado o método de estimação de fluxo baseado no modelo em corrente, já apresentado anteriormente, e empregado o método de PWM Regular Trifásico Simétrico [Seixas,1988].

Nos resultados apresentados a seguir, verifica-se o desempenho da estratégia quando do carregamento inicial do barramento CC e magnetização da máquina de indução.

Foi considerado que, inicialmente, a máquina de indução estava completamente desmagnetizada e que a tensão do barramento era igual a do banco de baterias, ou seja, 96 V. Considerando a existência de um certo conjugado primário, supôs-se que, quando a velocidade atingisse cerca de um terço do valor nominal, realizam-se a magnetização da máquina e o controle da tensão do barramento CC.

As figuras 4.7 e 4.8 mostram a amplitude do vetor fluxo de rotor (de referência e estimado), bem como a tensão do barramento CC (de referência e real). Deve-se observar que procurou-se aplicar, inicialmente, um fluxo inferior ao nominal. Na prática, o fluxo deve ser realmente limitado para que a  $f_{cem}$  da máquina seja suficientemente baixa para permitir a imposição das correntes pelo barramento CC, ainda com tensão baixa. Depois que a tensão do barramento atingir um valor suficientemente elevado, pode-se ordenar a aplicação de fluxo nominal. É importante notar que a mudança de fluxo para o nominal provoca pequena variação de  $V_{cc}$ , indicando um bom desacoplamento do controle.

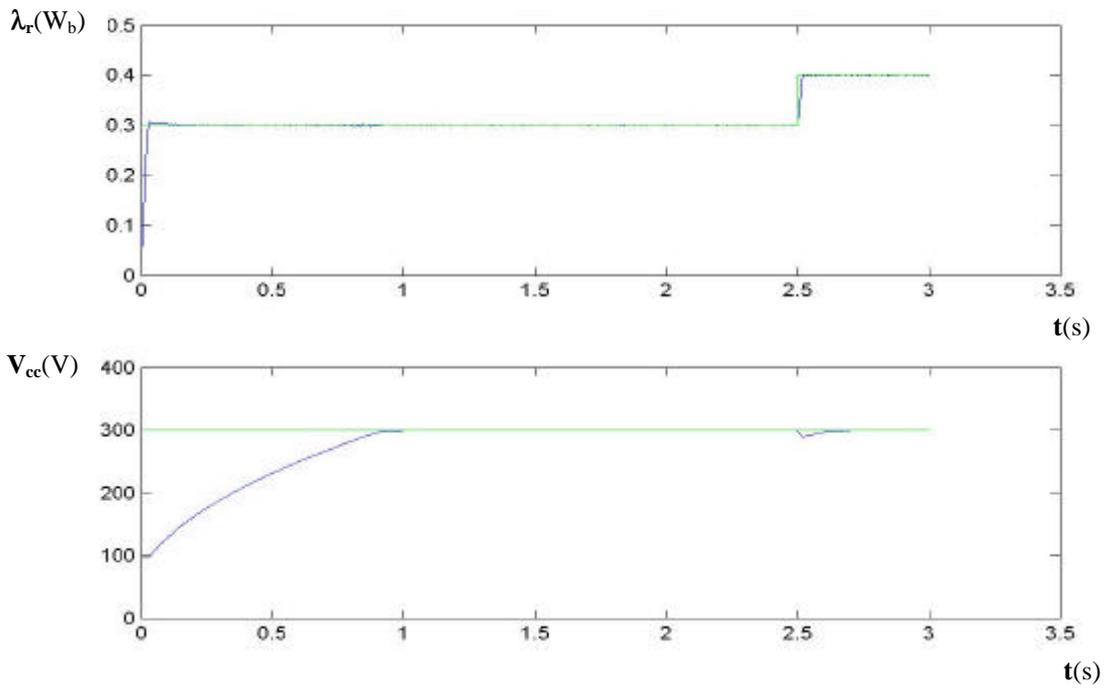


Figura 4.7 Resultado de simulação de controle do barramento CC e fluxo do gerador isolado

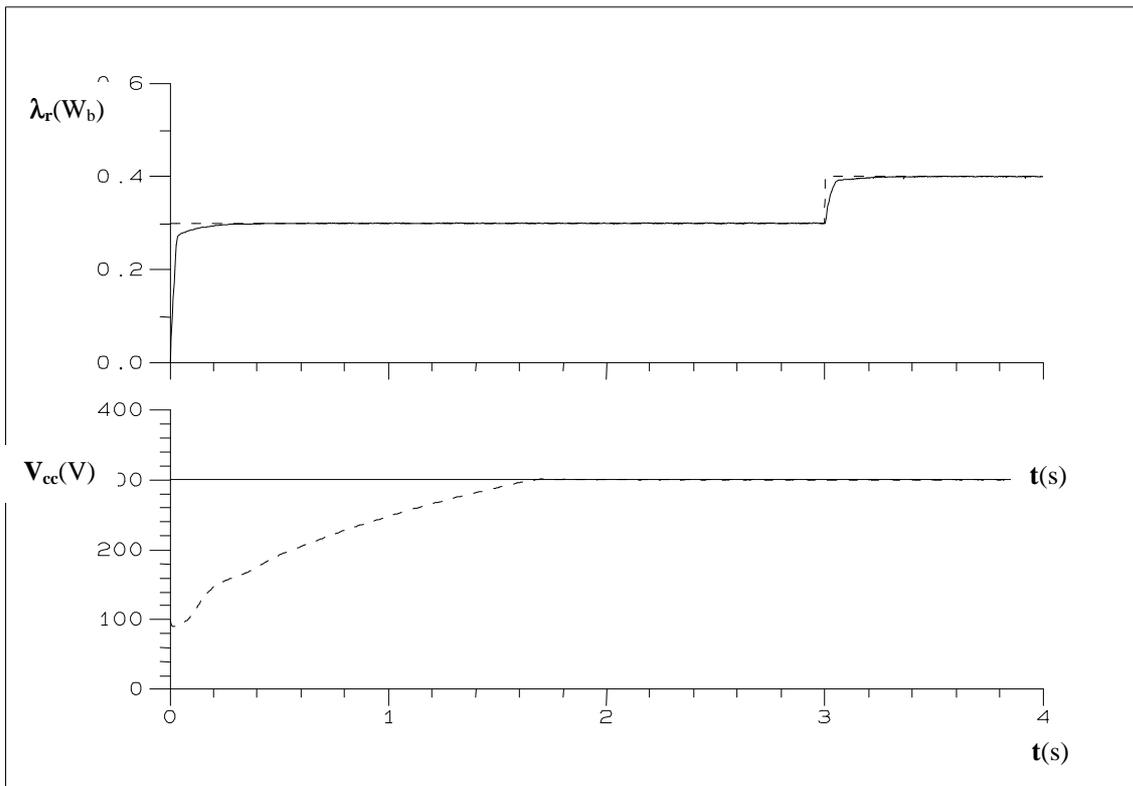


Figura 4.8 Resultado experimental de controle do barramento CC e fluxo do gerador isolado

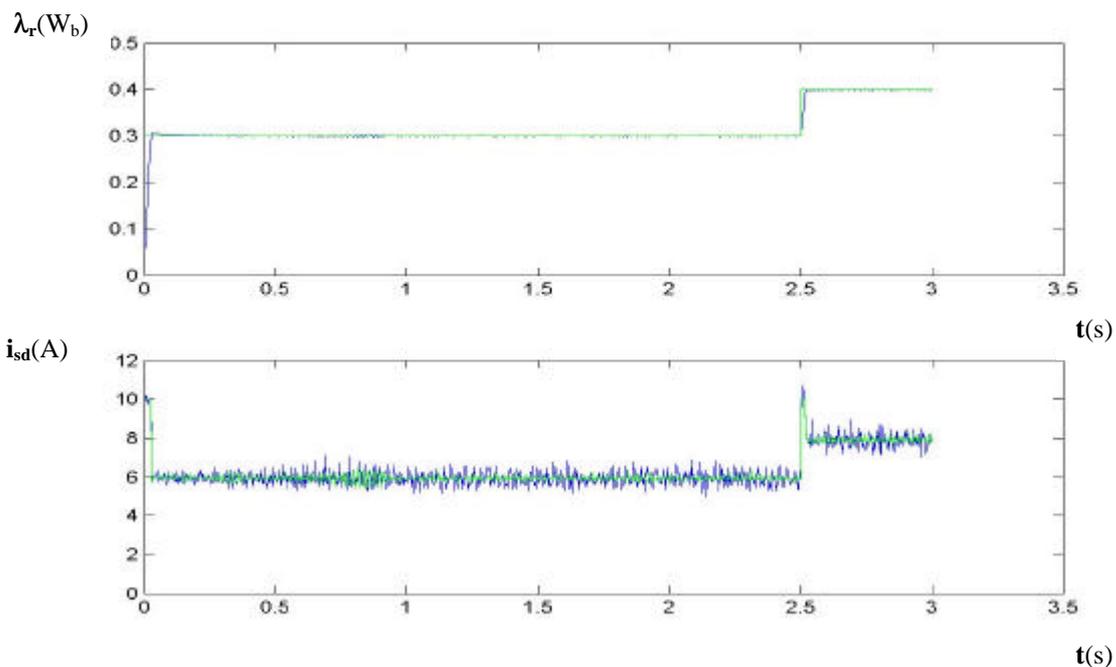


Figura 4.9 Resultado de simulação de controle do fluxo e corrente do gerador isolado

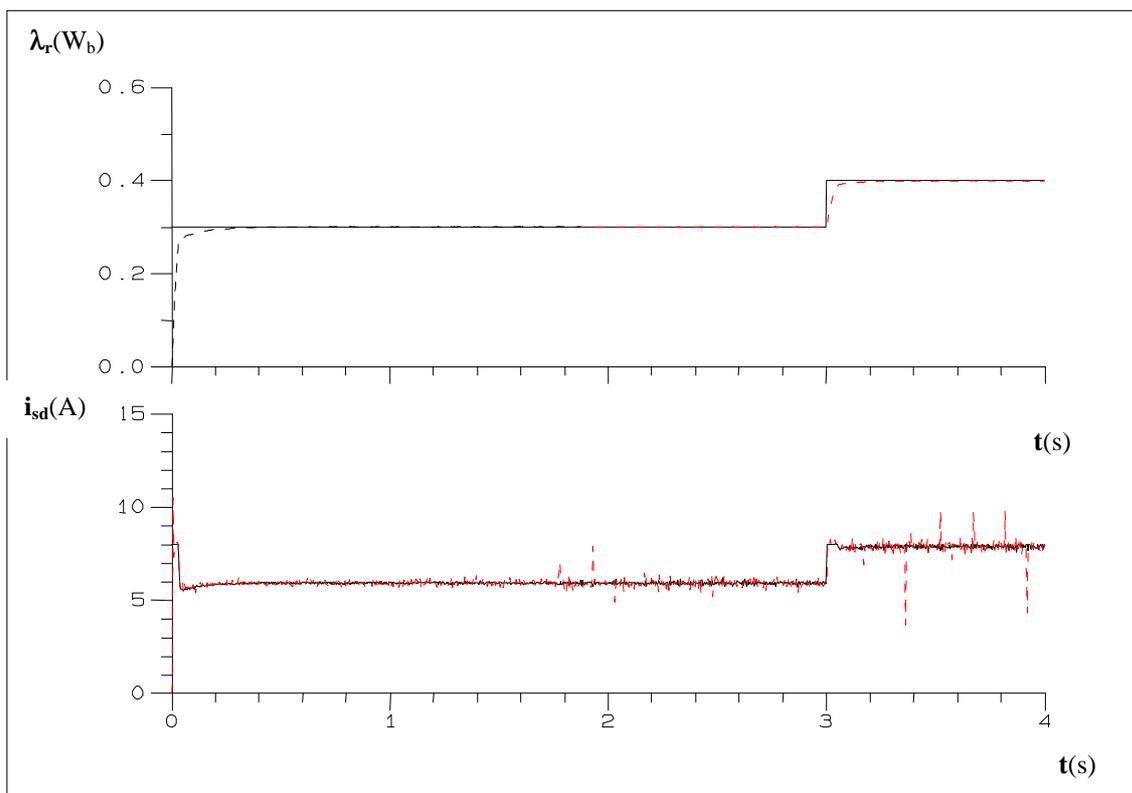
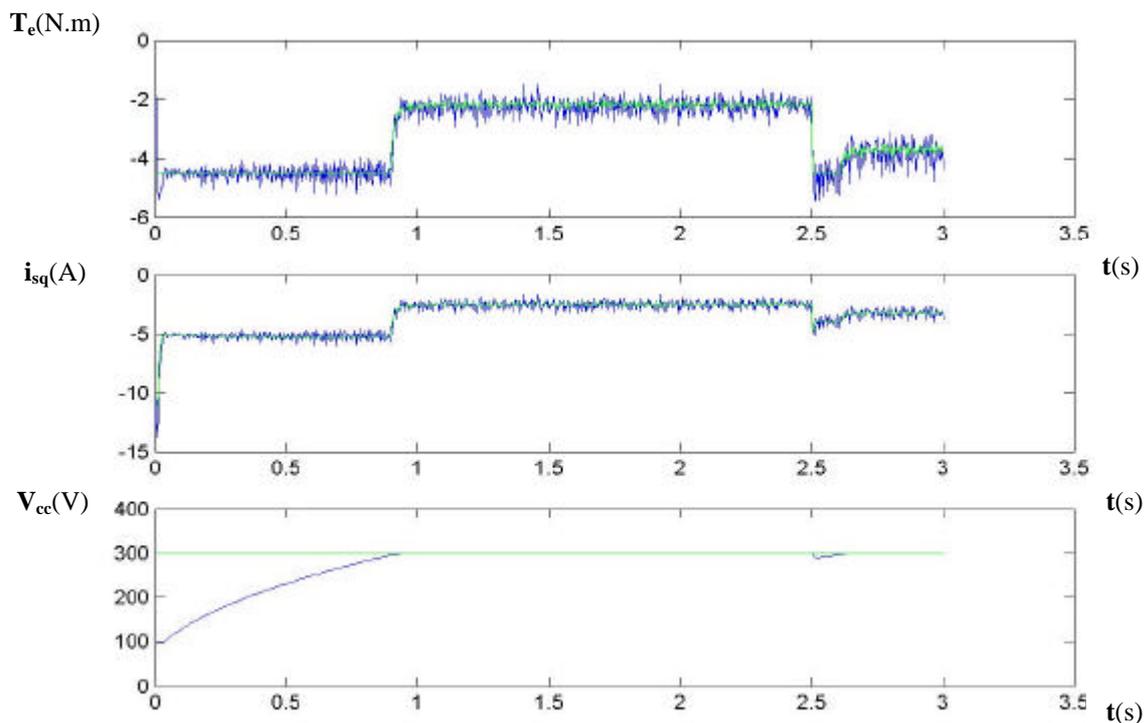


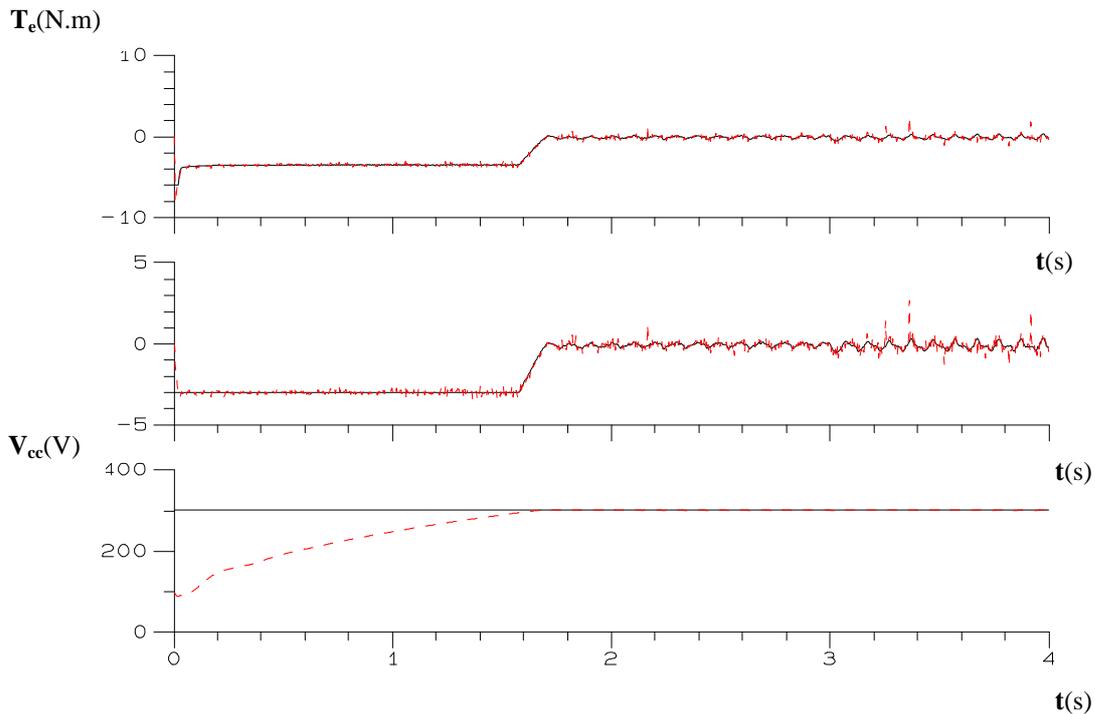
Figura 4.10 Resultado experimental de controle do fluxo e corrente do gerador isolado

As figuras 4.9 e 4.10 apresentam as curvas de fluxo e corrente de eixo direto em referencial orientado. Observa-se o bom desempenho do controlador de corrente, mesmo não tendo sido usados os termos de compensação. A semelhança das curvas de fluxo e corrente ilustram a forte dependência entre essas grandezas.

As figuras 4.11 e 4.12 apresentam os valores reais e de referência do conjugado, da corrente de eixo em quadratura e da tensão Vcc. Verifica-se a impossibilidade de carregar o barramento CC mais rapidamente, já que isso demandaria o aumento do valor do conjugado, que está saturado maior parte do intervalo de carregamento, devido as limitações de potência da bancada. As curvas de conjugado e corrente de eixo q apresentam a mesma forma atestando a correta orientação pelo campo.



**Figura 4.11** Resultado de simulação de controle do conjugado e corrente em quadratura do gerador isolado da rede

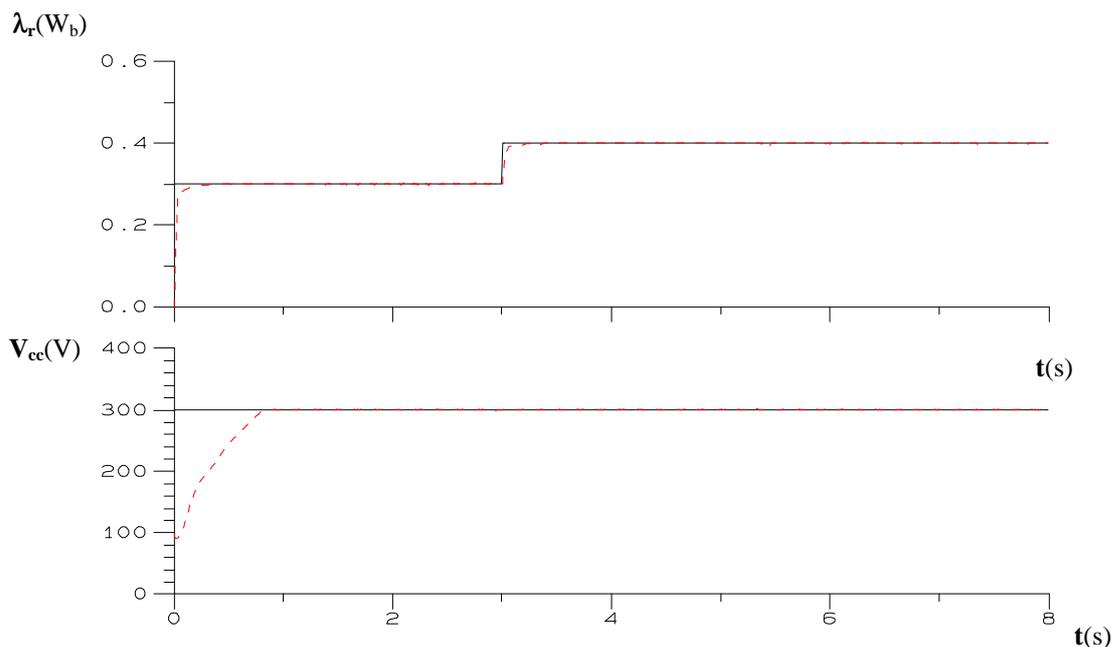


**Figura 4.12 Resultado experimental do controle do conjugado e corrente em quadratura do gerador isolado da rede**

Além da partida do sistema, foram analisadas duas outras situações: imposição de carga resistiva ao barramento e variação de velocidade da máquina, simulando uma possível variação de vento.

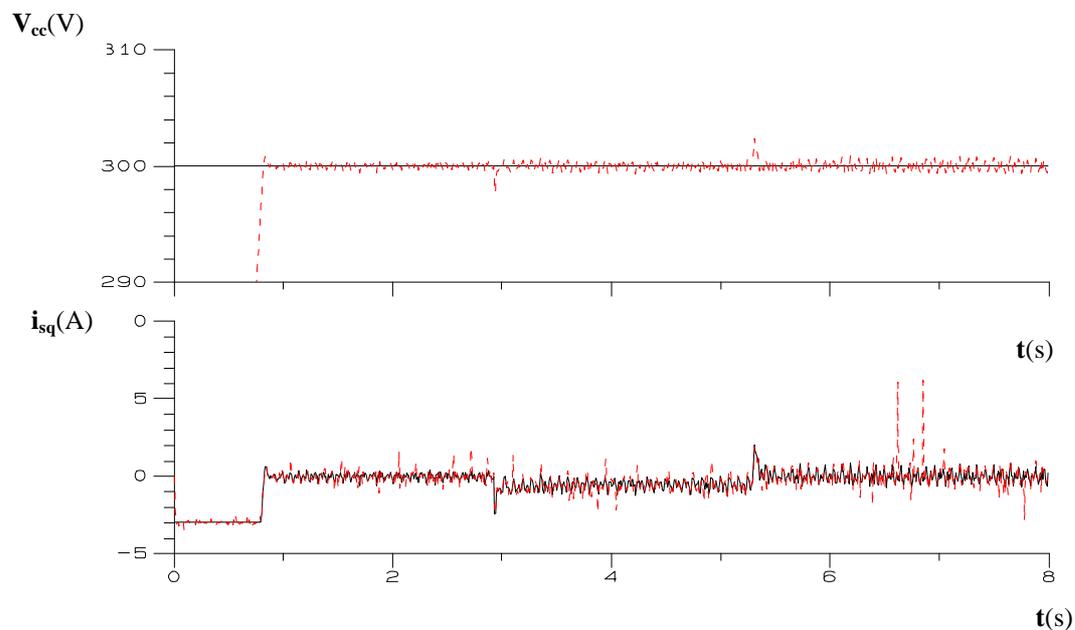
#### **Imposição de Carga Resistiva ao barramento CC:**

Aos 2,8 segundos, aproximadamente, foi imposta uma carga resistiva de 480 ohms aos terminais do barramento CC e aos 5,3 segundos, aproximadamente, a mesma foi retirada. Observando a figura 4.13, verifica-se que o fluxo magnético praticamente não se altera.



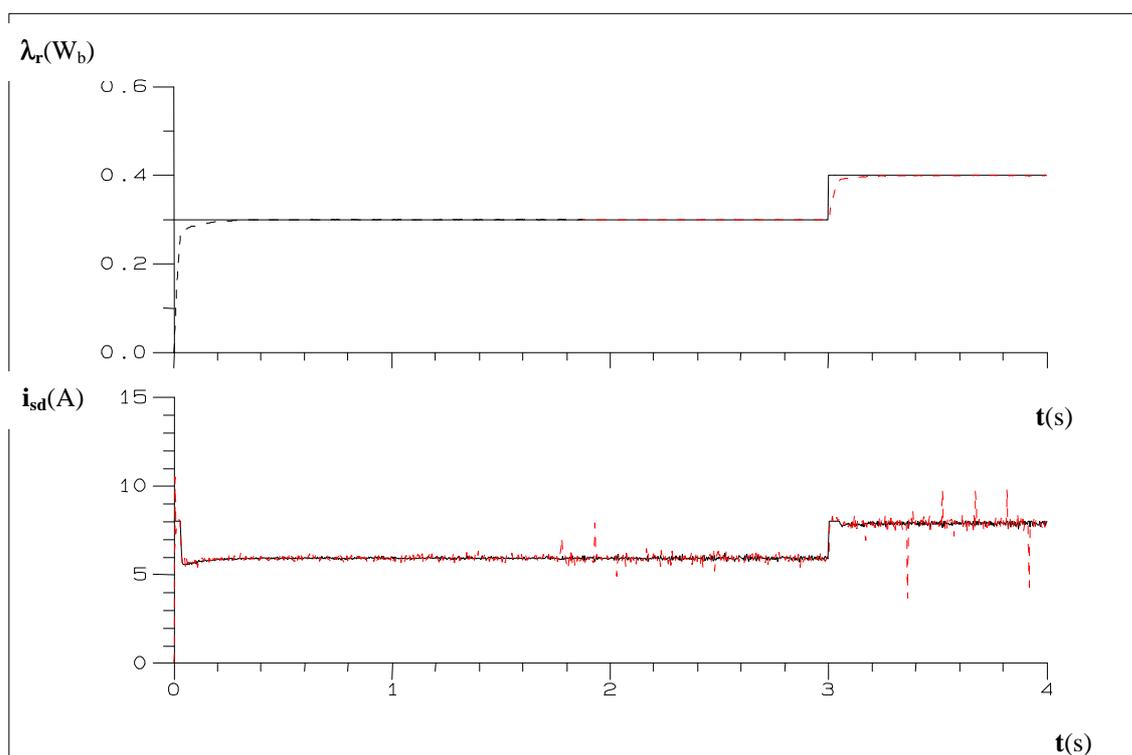
**Figura 4.13 Resultado experimental de controle do fluxo de rotor mediante a imposição de uma carga resistiva**

Pela variação de  $I_{sq}$ , observa-se na figura 4.14 que durante a entrada da carga  $V_{cc}$  consegue ser controlado solicitando absorção de potência gerada.

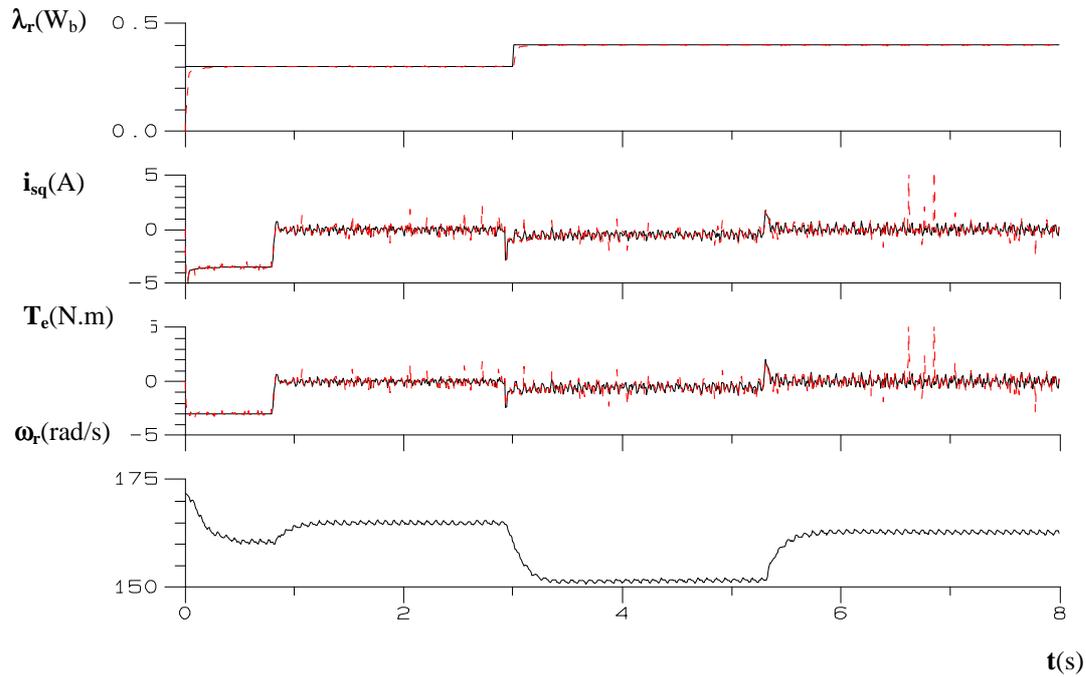


**Figura 4.14 Resultado experimental de controle de  $V_{cc}$  mediante a imposição de uma carga resistiva**

Mesmo com a absorção de potência gerada, verifica-se na figura 4.15, que o bom desacoplamento do controle, permitiu que o fluxo e a corrente  $i_{sd}$  não fossem afetados.



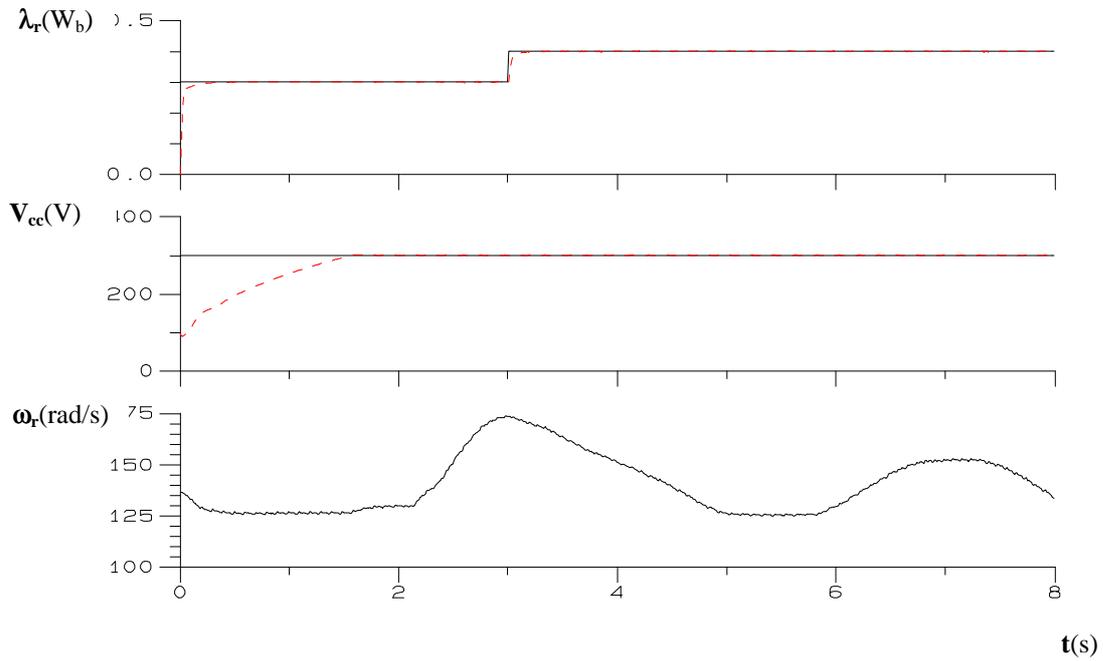
**Figura 4.15** Resultado experimental de controle de fluxo de rotor mediante a imposição de uma carga resistiva



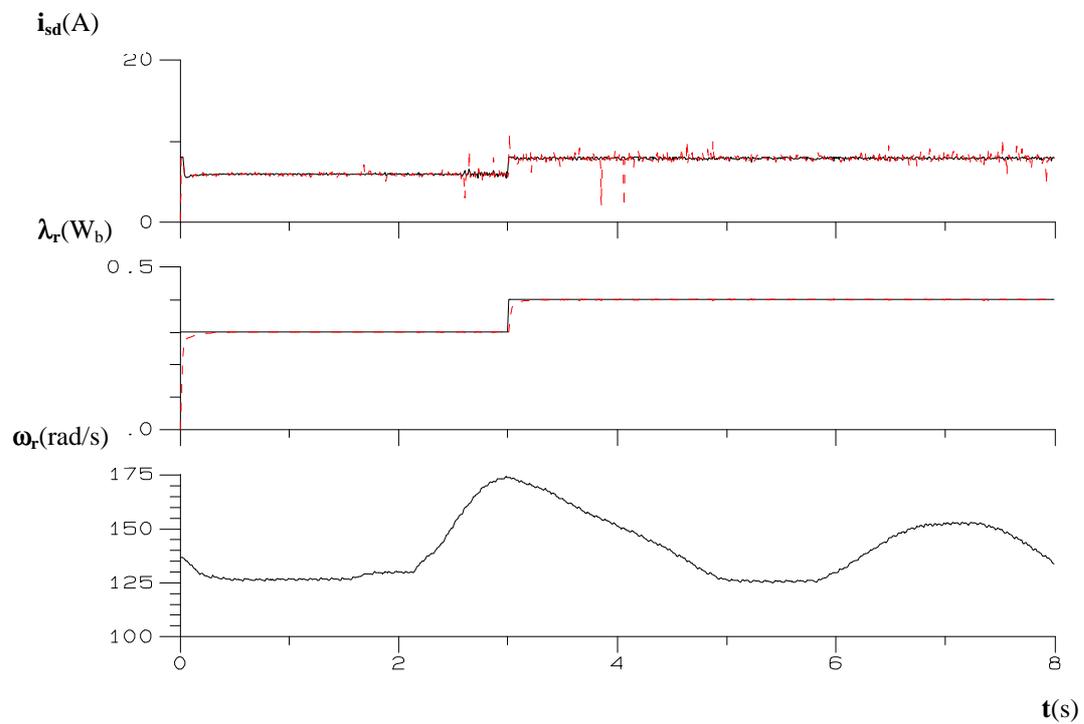
**Figura 4.16** Resultado experimental de controle do fluxo de rotor, corrente em quadratura e conjugado mediante aplicação de carga resistiva

**Variação de Velocidade da Máquina:**

A figura 4.17 mostra que mesmo com a variação de velocidade que foi imposta a máquina, o sistema foi capaz de controlar a tensão do barramento e o fluxo.



**Figura 4.17** Resultado experimental do controle de Fluxo e tensão  $V_{cc}$  mediante variação de velocidade



**Figura 4.18** Resultado experimental de controle de Fluxo e corrente mediante variação de velocidade

Como era de se esperar, estabelecida a tensão do barramento  $V_{cc}$ , nos resultados da figura 4.18, o controle das correntes é mantido.

## Capítulo 5

### Sistema de Geração Conectado à Rede Elétrica

#### 5.1 Gerador de Indução com Rotor tipo Gaiola

Neste caso, a topologia estudada é composta de um gerador de indução com rotor tipo gaiola acionado por uma máquina primária de velocidade variável (turbina eólica) e ligado através de conversores a IGBT's a um barramento infinito, formando um elo CA-CC-CA. O esquema permite a conexão de cargas em CC ou CA.

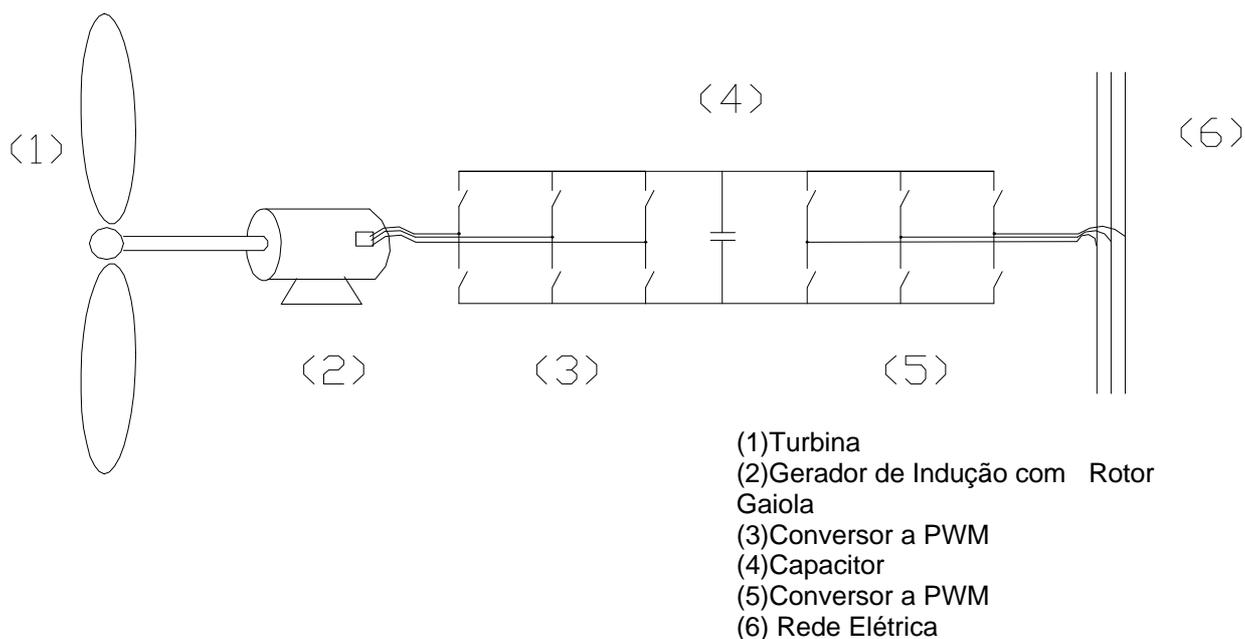


Figura 5.1 Gerador ligado à rede pelo estator

O controle do sistema foi dividido da seguinte maneira : o conversor conectado à rede é acionado de modo a controlar a tensão do barramento CC e o fator de potência de saída do gerador, e o conversor ligado à máquina é acionado de modo a assegurar o controle do fluxo e do conjugado eletromagnético da mesma.

Considerando que por um lado, o conversor está ligado ao barramento infinito (rede elétrica) através de uma impedância  $R + j\omega L$ , então pode-se escrever a equação abaixo:

$$V_{S,ABC} = V_{conv,ABC} + R \cdot i_{S,ABC} + L \frac{di_{S,ABC}}{dt} \quad (5.1)$$

Na expressão vetorial acima, foi considerada como positiva a corrente que flue da rede para o conversor.

Multiplicando ambos os lados pela matriz transformação abc  $\xrightarrow{T}$  dq0, tem-se:

$$T \cdot V_{S,ABC} = T \cdot V_{conv,ABC} + R \cdot T \cdot i_{S,ABC} + T \cdot L \frac{d \cdot i_{S,ABC}}{dt} \quad (5.2)$$

E então :

$$V_{S,DQ0} = V_{conv,DQ0} + R \cdot i_{S,DQ0} + T \cdot L \frac{d(T^{-1} \cdot i_{S,DQ0})}{dt} \quad (5.3)$$

Calculando os termos para um referencial “dq” arbitrário, tem-se que :

$$V_{sD} = V_{conv,D} + R \cdot i_{sD} + L \frac{di_{sD}}{dt} - L \cdot \omega_{eixos} i_{sQ} \quad (5.4)$$

e

$$V_{sQ} = V_{conv,Q} + R \cdot i_{sQ} + L \frac{di_{sQ}}{dt} + L \cdot \omega_{eixos} \cdot i_{sD} \quad (5.5)$$

As expressões dos fluxos de potência ativa e reativa da rede para o conversor podem ser obtidas como segue. Considere-se que em regime permanente:

$$\begin{cases} V_{SA} = V \cos(\omega t + \mathbf{j}_v) \\ V_{SB} = V \cos(\omega t + \mathbf{j}_v - 120^\circ) \\ V_{SC} = V \cos(\omega t + \mathbf{j}_v + 120^\circ) \end{cases} \quad (5.6)$$

e

$$\begin{cases} i_{SA} = I \cos(\omega t + \mathbf{j}_I) \\ i_{SB} = I \cos(\omega t + \mathbf{j}_I - 120^\circ) \\ i_{SC} = I \cos(\omega t + \mathbf{j}_I + 120^\circ) \end{cases} \quad (5.7)$$

Aplicando-se a transformação ABC  $\iff$   $\alpha\beta$ , obtém-se :

$$\vec{V}_S^{ab} = \tilde{V} e^{j\omega t} \quad (5.8)$$

e

$$\vec{I}_S^{ab} = \tilde{I} e^{j\omega t} \quad (5.9)$$

Onde,

$$\tilde{V} = V e^{j\mathbf{j}_v} \quad (5.10)$$

e

$$\tilde{I} = I e^{j\mathbf{j}_I} \quad (5.11)$$

O fluxo de potência ativa é :

$$P = 3 \frac{V}{\sqrt{2}} \frac{I}{\sqrt{2}} \cos(\mathbf{j}_v - \mathbf{j}_I) = \frac{3}{2} VI \cos(\mathbf{j}_v - \mathbf{j}_I). \quad (5.12)$$

O valor acima pode ser também obtido a partir de :

$$P = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{\tilde{V}_S^{ab} * \tilde{I}_S^{ab*}\} = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{\tilde{V}^{jv} I^* e^{-jI}\}. \quad (5.13)$$

$$= \frac{3}{2} \operatorname{Re}\{V^{jv} * I e^{-jI}\}$$

$$= \frac{3}{2} VI \cos(\mathbf{j}_v - \mathbf{j}_I)$$

Portanto, o fluxo de potência ativa pode ser expresso por :

$$P = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\left\{(v_{sd} + jv_{sq})(i_{sd} - ji_{sq})\right\} = \frac{3}{2} (v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}). \quad (5.14)$$

Analogamente, obtém-se, para a potência reativa :

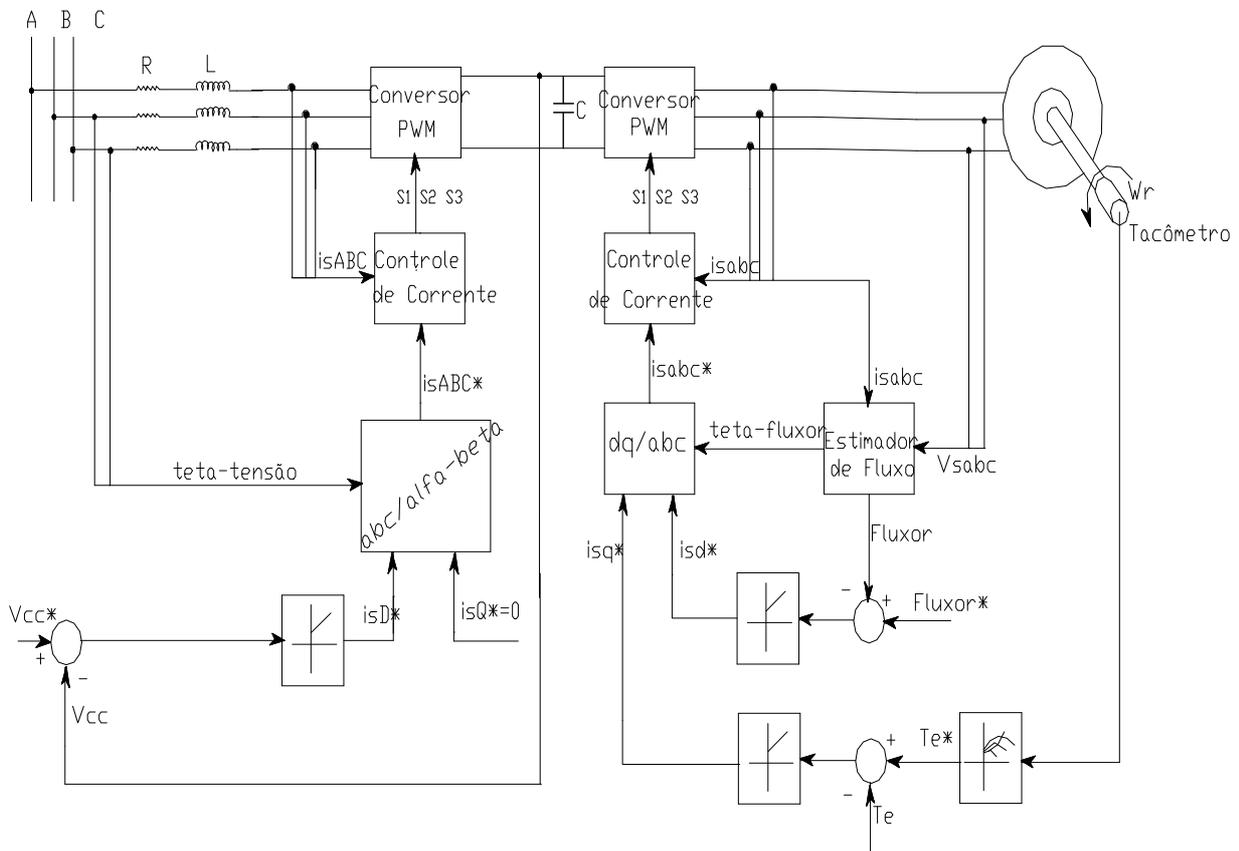
$$Q = \frac{3}{2} (v_{sq}i_{sd} - v_{sd}i_{sq}). \quad (5.15)$$

Em referencial orientado pelo vetor tensão ( $v_{sq} = 0$ ) e, considerando que o aerogerador não afeta a tensão da rede, o controle dos fluxos de potência ativa e reativa pode ser realizado pela imposição de  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$ , respectivamente.

O controle do fluxo de potência ativa será realizado com o objetivo de manter a tensão do barramento CC em seu valor nominal. O fator de potência será mantido unitário com o controle de potência reativa em zero.

A figura 5.2 mostra o diagrama de blocos do controle proposto ao sistema.

O controle de fluxo e conjugado do gerador foi realizado de forma semelhante ao descrito no capítulo 4, empregando-se a orientação pelo fluxo de rotor.



**Figura 5.2 Diagrama de blocos do controle de gerador conectado à rede pelo estator**

Nesta estratégia, é simulada a imposição de conjugado primário e o conjugado eletromagnético foi obtido da curva de conjugado para máxima absorção de

potência pela turbina, inerente a cada gerador. O controle do inversor é baseado na orientação pelo fluxo de rotor. Dessa forma, o fluxo e a potência extraída da turbina podem ser controlados de maneira independente. Os resultados de simulação, apresentados adiante, demonstram o desacoplamento das malhas. No lado do conversor ligado à rede, conforme mencionado, para o controle da tensão do barramento CC é tomada a orientação pela tensão da rede.

Conforme indicado nas equações. 5.14 e 5.15 e, considerando o uso de referencial orientado pelo vetor tensão da rede, as correntes  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$  precisam ser impostas para garantir o controle dos fluxos de potência ativa e reativa. Essas correntes são ditadas pelas expressões 5.4 e 5.5, ou, em referencial orientado pelo vetor tensão da rede:

$$\frac{di_{sD}}{dt} = \frac{-1}{L}V_{conv,D} - \frac{R}{L}i_{sD} + w_{eixos}i_{sQ} + \frac{1}{L}V_{s,D} \quad (5.16)$$

$$\frac{di_{sQ}}{dt} = \frac{-1}{L}V_{conv,Q} - \frac{R}{L}i_{sQ} - w_{eixos}i_{sD} \quad (5.17)$$

Como, nos instantes iniciais, a tensão do barramento CC é muito baixa, as tensões na saída do conversor, grandezas utilizadas para o controle das componentes de corrente, são também muito baixas e, portanto, insuficientes para garantir o controle eficaz das correntes. Porém, a tensão  $V_{sD}$  contribui para o crescimento da corrente  $i_{sD}$  e, conseqüentemente para o aumento da tensão do barramento CC. Quando esta tensão se torna suficientemente alta, o controle das correntes fica assegurado, garantindo-se o controle da tensão do barramento CC e do fator de potência.

O controle de fluxo e conjugado do gerador é realizado como indicado nas figuras 5.3 e 5.4

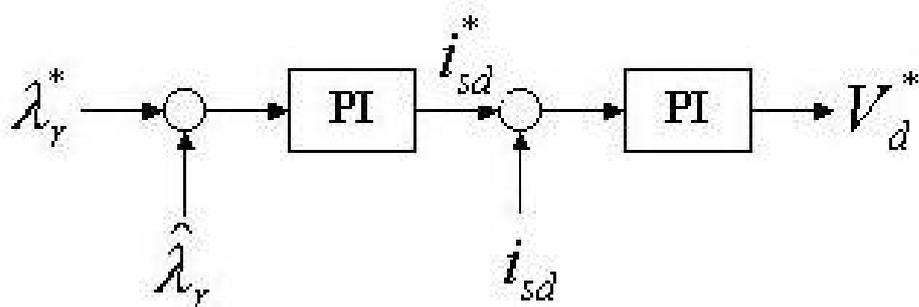


Figura 5.3 Malha de controle de fluxo de gerador ligado à rede pelo estator

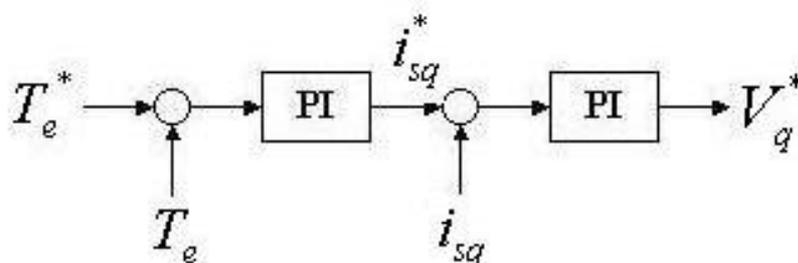


Figura 5.4 Malha de controle de conjugado de gerador ligado à rede pelo estator

No retificador, o controle sobre o erro de tensão no barramento CC, agora, gerará a componente “ $i_{sd}^*$ ”. Tomando um fator de potência unitário, a componente de corrente correspondente à potência reativa absorvida “ $i_{sq}^*$ ” deverá ser nula. Nos controladores de corrente, as tensões de referência, depois de convertidas para “ABC”, são usadas no algoritmo de PWM .

Para a determinação das componentes  $V_{sd}^*$  e  $V_{sq}^*$  no controle de corrente, foram incluídas algumas compensações, conforme as equações 5.16 e 5.17.

Então,

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{sd} + \frac{1}{L}V_{DComp} \quad (5.18)$$

$$\frac{di_{sQ}}{dt} = -\frac{R}{L}i_{sQ} + \frac{1}{L}V_{QComp} \quad (5.19)$$

Onde,

$$V_{DComp} = V_{sD} + \omega_{eixos} L i_{sQ} - V_{convD} \quad (5.20)$$

$$V_{QComp} = -\omega_{eixos} L i_{sD} - V_{convQ} \quad (5.21)$$

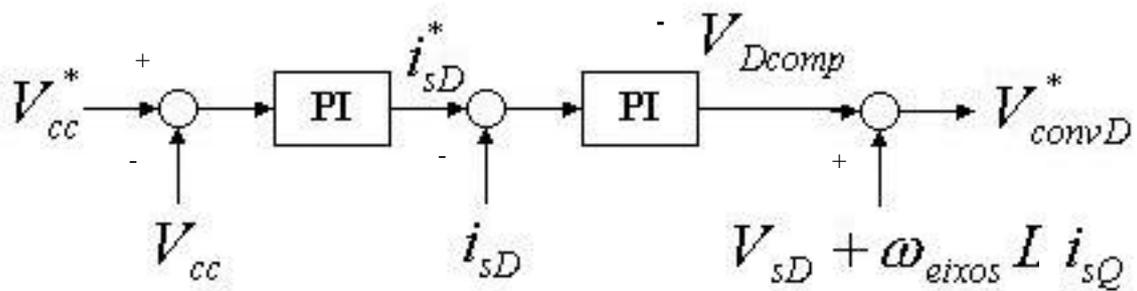


Figura 5.5 Malha de controle de tensão do barramento CC de gerador ligado à rede pelo estator

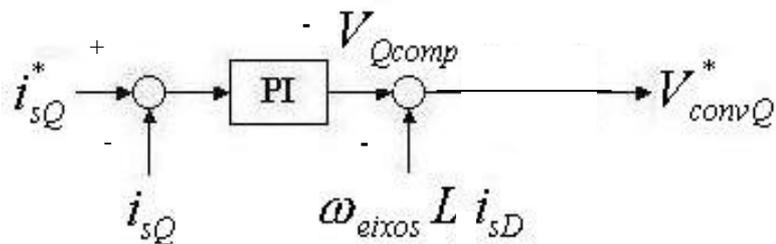
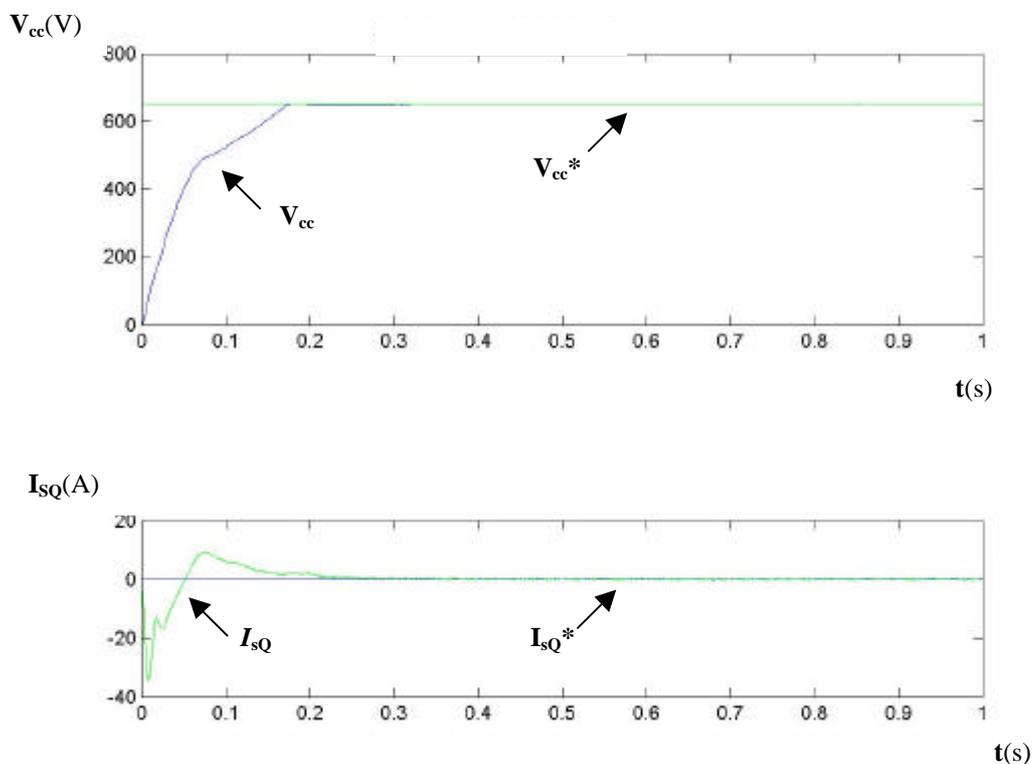


Figura 5.6 Malha de controle de fator de potência de gerador ligado à rede pelo estator

Os resultados, a seguir, mostram como a máquina respondeu ao controle imposto.



**Figura 5.7 Resultado de simulação do estabelecimento da tensão do barramento CC**

Como previsto, pode-se observar nas figuras 5.7 e 5.8, que, apesar de não ser possível o controle instantâneo das componentes de corrente (no início), a tensão do barramento CC cresce. Quando a tensão CC se torna elevada, obtém-se um bom controle e o comportamento do sistema é mais previsível.

Após o estabelecimento da tensão no Barramento CC, foi imposta à máquina um conjugado primário. Com o aumento da velocidade, procurou-se aplicar um conjugado eletromagnético de modo a obter um aproveitamento ótimo da turbina, baseado na característica  $T_e \times \omega_r$  da mesma, como representado nas figuras 5.9 e 5.10.

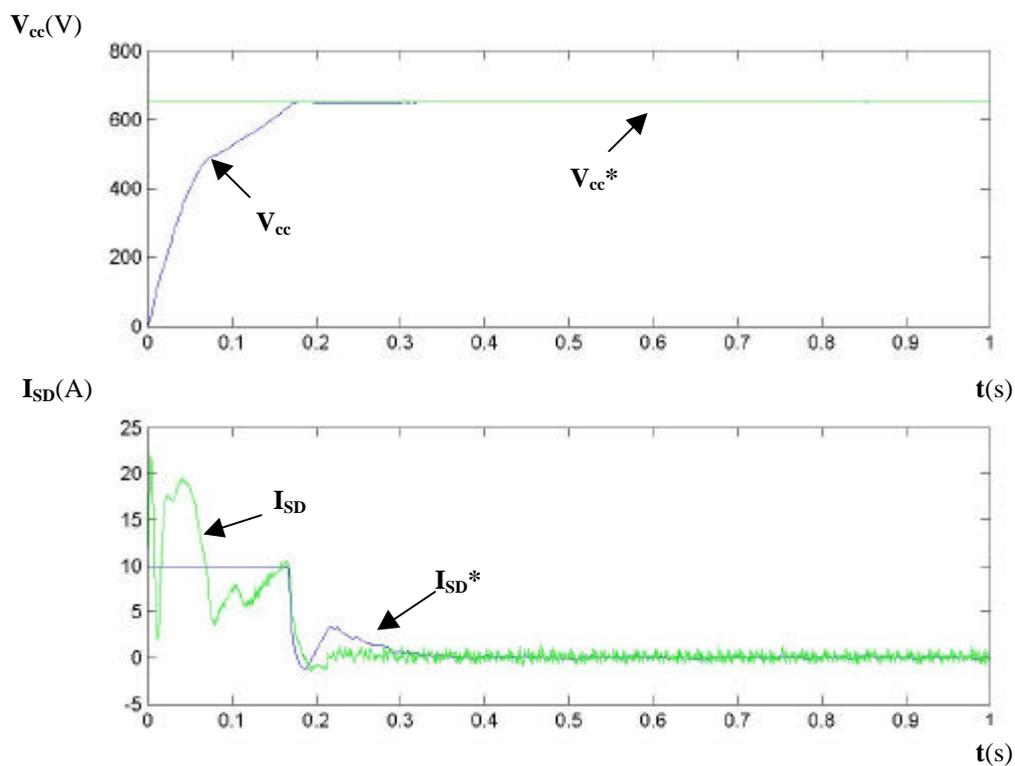


Figura 5.8 Resultado de simulação do estabelecimento da tensão do barramento CC

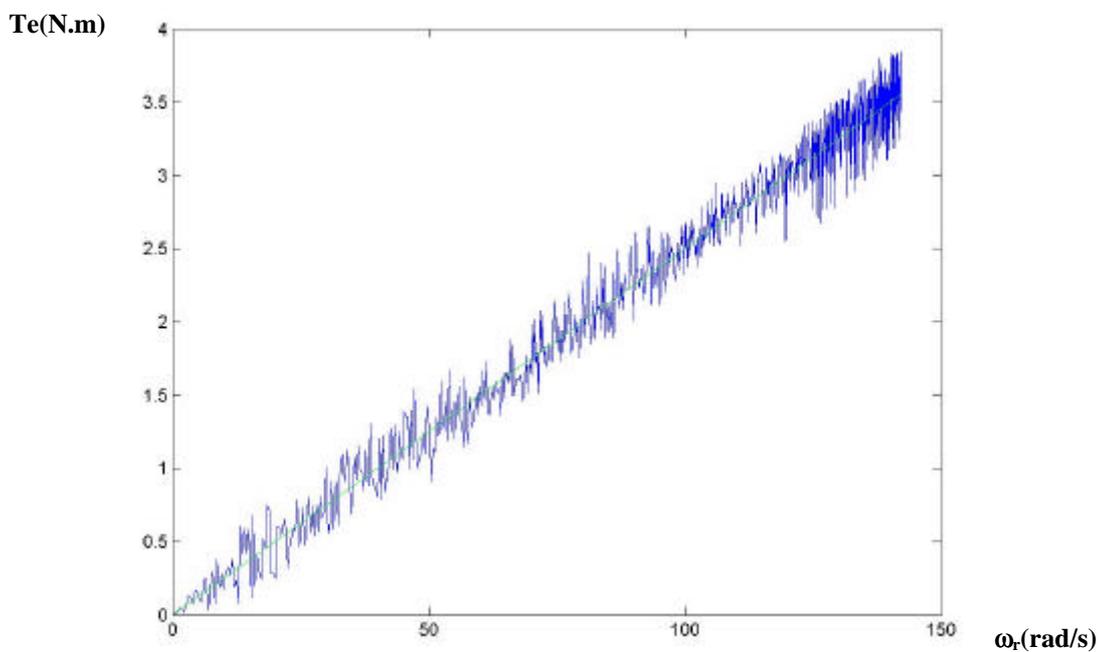
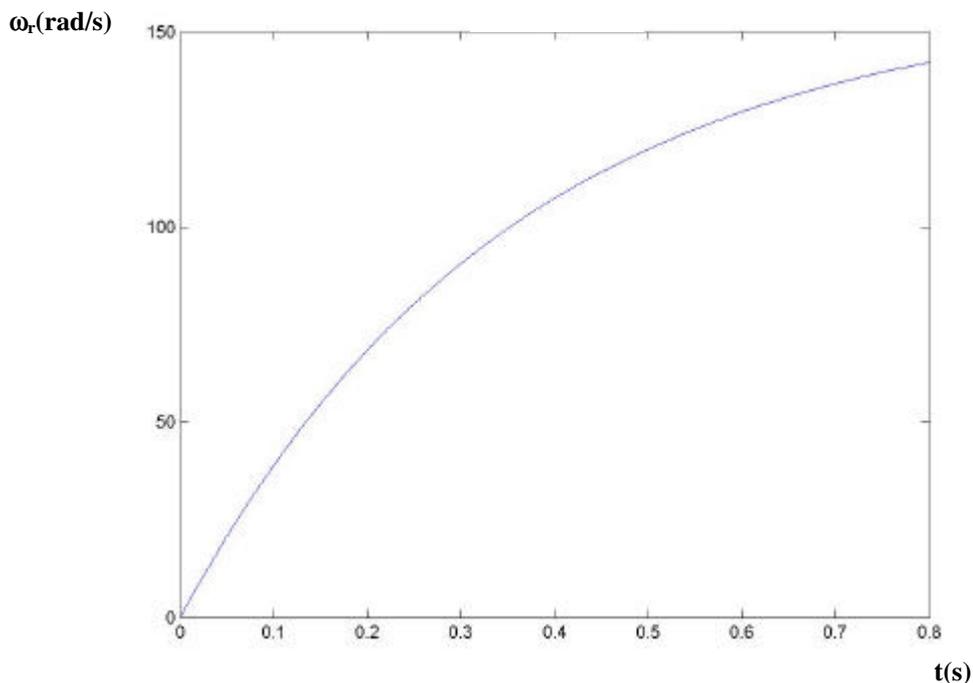
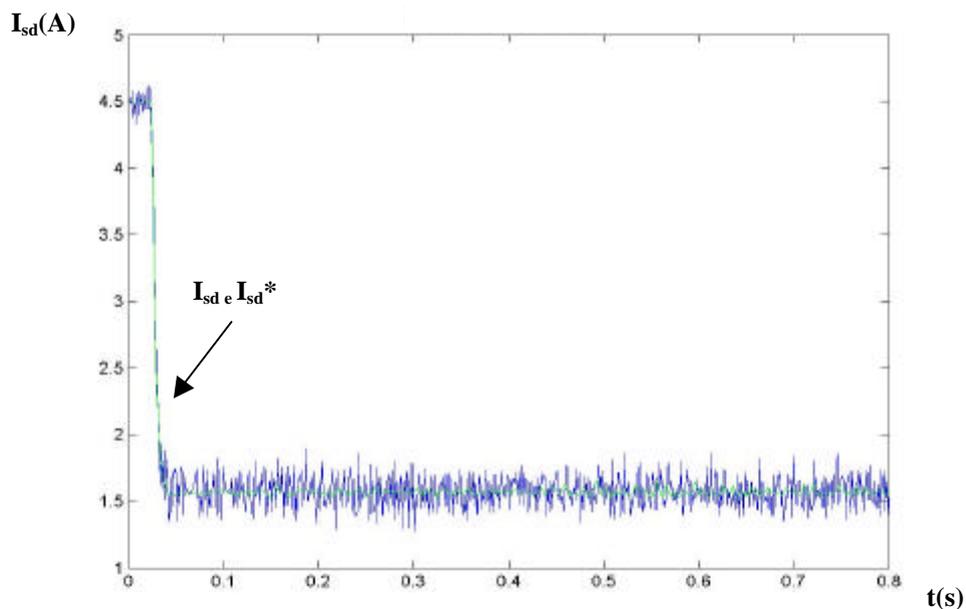


Figura 5.9 Simulação da curva de conjugado imposta à máquina

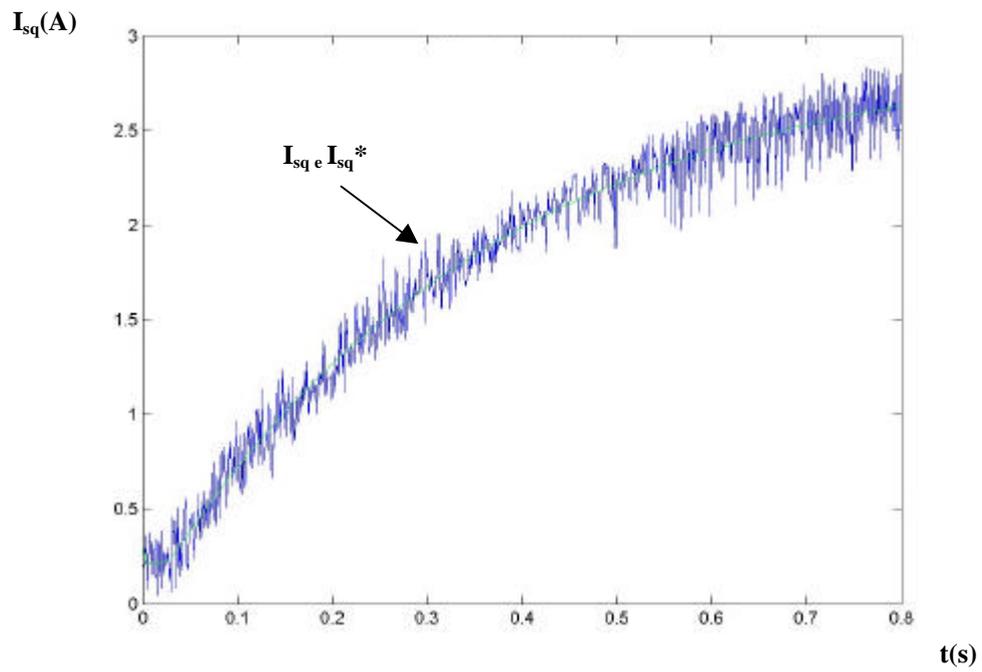


**Figura 5.10** Resultado de simulação da curva de velocidade da máquina

Como a tensão do barramento já havia sido estabelecida, obtém-se uma boa resposta de controle de corrente e conseqüentemente, de fluxo e conjugado. É o que pode ser observado nas figuras 5.11 e 5.12.



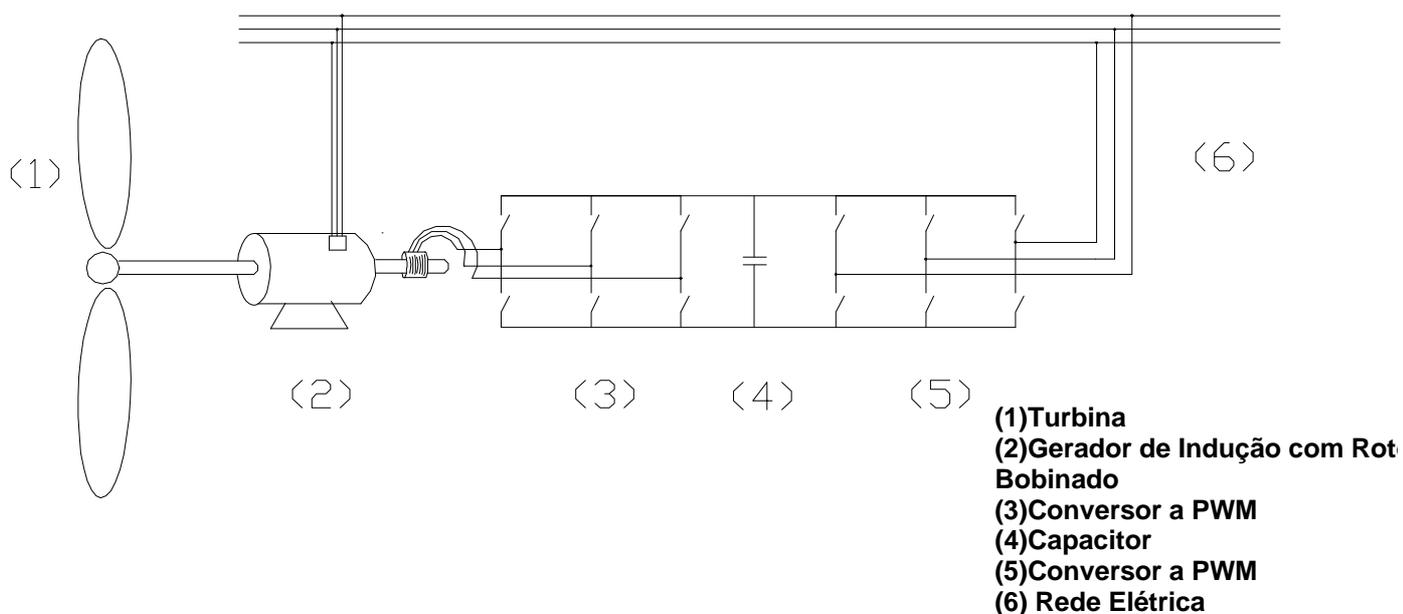
**Figura 5.11** Resultado de simulação do controle de corrente do lado da máquina



**Figura 5.12** Resultado de simulação do controle de corrente de eixo “q” do lado da máquina

## 5.2 Gerador de Indução com Rotor Bobinado:

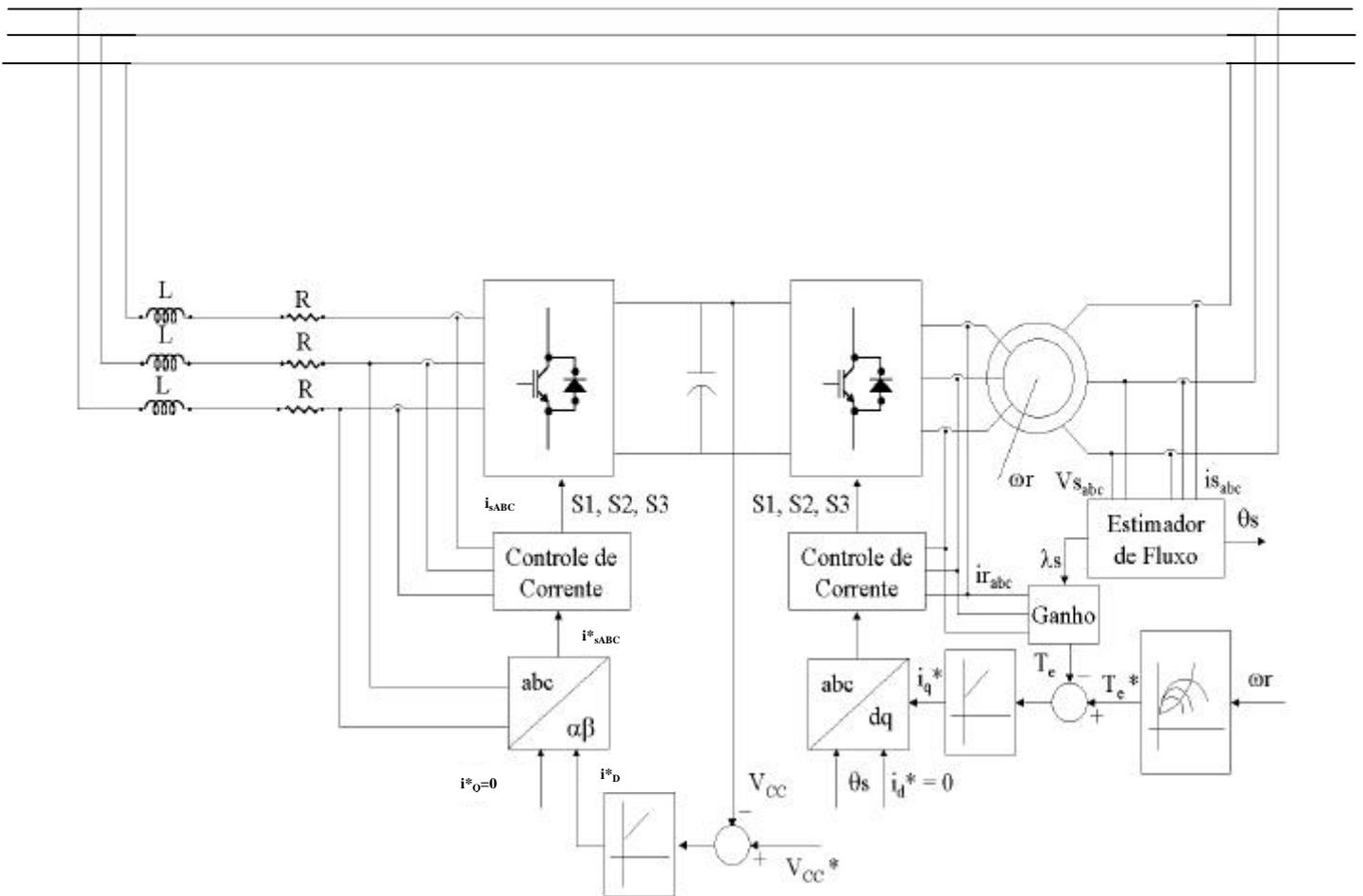
Nesta topologia, com o acesso às duas terminações da máquina, é proposto o controle pelo rotor. A máquina é analisada com o estator ligado diretamente à rede e o rotor ligado também à rede através do elo AC-DC-AC. Nessa estrutura, o fluxo de estator é praticamente imposto pela tensão do barramento infinito.



**Figura 5.13 : Gerador de Indução de Rotor Bobinado ligado duplamente à rede**

Para a modelagem da máquina foi utilizado o modelo vetorial utilizando as equações da máquina referidas ao estator.

A figura 5.14 mostra o diagrama de blocos do controle proposto para o sistema.



**Figura 5.14** Diagrama de blocos de controle de um gerador de indução duplamente alimentado pela rede

Baseando-se em que a conexão direta do estator à rede manterá o fluxo aproximadamente constante, torna-se desnecessário o controle do mesmo. Por ele foi feita a orientação do controle do gerador.

A potência ativa total injetada na máquina(estator e rotor) é :

$$P = \frac{3}{2} \text{Re}\{\vec{v}_s * \vec{i}_s^*\} + \frac{3}{2} \text{Re}\{\vec{v}_r * \vec{i}_r^*\} \quad (5.22)$$

Substituindo as equações das tensões em referencial síncrono e considerando a operação em regime permanente, tem-se:

$$P = \frac{3}{2} R_s |\vec{i}_s|^2 + \frac{3}{2} R_r |\vec{i}_r|^2 - \frac{3}{2} \mathbf{w} \operatorname{Im}\{\vec{I}_s * \vec{i}_s^*\} - \frac{3}{2} (\mathbf{w} - \mathbf{w}_r) \operatorname{Im}\{\vec{I}_r * \vec{i}_r^*\} \quad (5.23)$$

Os dois primeiros termos da expressão acima correspondem, obviamente, às perdas resistivas, sendo as demais referentes à conversão eletromecânica da energia. Reescrevendo apenas estes dois últimos termos em função do fluxo de estator e corrente de rotor, obtém-se uma expressão para a potência eletromagnética:

$$P_e = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} \mathbf{w}_r \operatorname{Im}\{\vec{i}_r^* \cdot \vec{I}_s\} \quad (5.24)$$

A expressão acima, poderia também ser obtida a partir da equação de conjugado:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_s} \operatorname{Im}\{\vec{i}_r^* * \mathbf{I}_s\} \quad (5.25)$$

Analogamente, para a potência reativa total, obtém-se:

$$Q = \frac{3}{2} \mathbf{w} \frac{|\vec{I}_s|^2}{L_s} + \frac{3}{2} (\mathbf{w} - \mathbf{w}_r) \mathbf{S} L_r |\vec{i}_r|^2 - \frac{3}{2} \mathbf{w}_r \frac{L_m}{L_s} \operatorname{Re}\{\vec{I}_s \vec{i}_r^*\} \quad (5.26)$$

O controle de potência ativa gerada foi realizado de modo a garantir máxima potência extraível da turbina, conforme já descrito. Assim, procurou-se impor o conjugado obtido da característica “ $T_e \times \omega_r$ ” ótima.

Em referencial orientado pelo fluxo de estator, tem-se :

$$T_e = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \mathbf{I}_{sd} \quad (5.27)$$

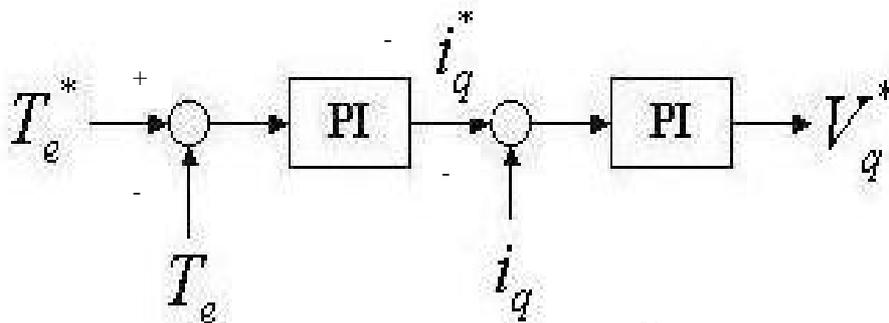
No diagrama da Figura 5.14, considerou-se a medição das correntes de estator e rotor, embora se pudesse evitar a medição de uma delas. As correntes de rotor poderiam, por exemplo, serem calculadas por :

$$i_{rd} = \frac{\hat{I}_{sd}}{L_m} - \frac{L_s}{L_m} i_{sd} \quad (5.28)$$

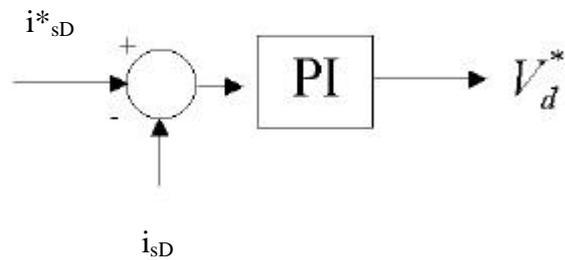
$$i_{rq} = \frac{\hat{I}_{sq}}{L_m} - \frac{L_s}{L_m} i_{sq} \quad (5.29)$$

O uso de sensores de corrente de rotor, no entanto, pode ser justificado tendo em vista a facilidade com que o fluxo de estator seria determinado e o baixo custo dos sensores em comparação com o custo dos aerogeradores.

Nas figuras 5.15 e 5.16 pode-se observar as malhas de controle das potências ativa e reativa. Nas malhas de corrente são geradas as componentes  $v_{sd}$  e  $v_{sq}$  de referência. Termos de compensação feed forward podem ser adicionados com o objetivo de compensar os acoplamentos já mencionados nas malhas de controle de corrente.



**Figura 5.15 Malha de controle de conjugado de um gerador de indução duplamente alimentado pela rede**



**Figura 5.16** Diagrama de blocos de controle de potência reativa um gerador de indução duplamente alimentado

No conversor do lado conectado à rede, analogamente ao estudo feito na topologia 2, o controle de tensão no barramento CC se dá pelo controle do fluxo de potência ativa e, ao mesmo tempo, garantindo fator de potência unitário. As compensações necessárias no controle de corrente também já analisadas são representadas nas figuras 5.17 e 5.18.

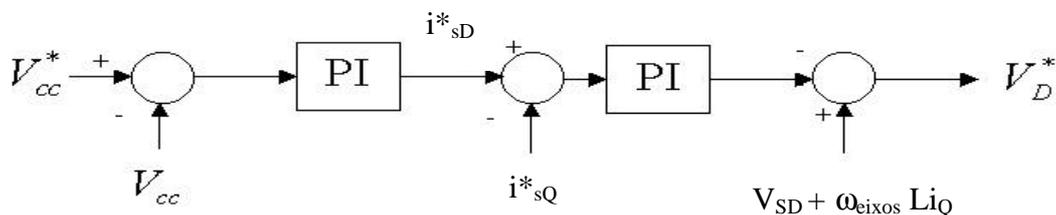


Figura 5.17 Diagrama de blocos de controle da tensão do barramento CC

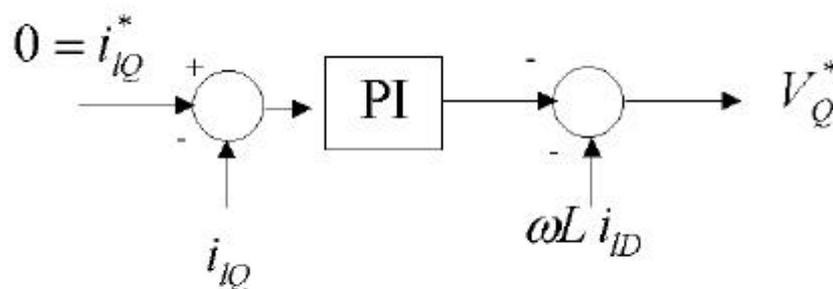


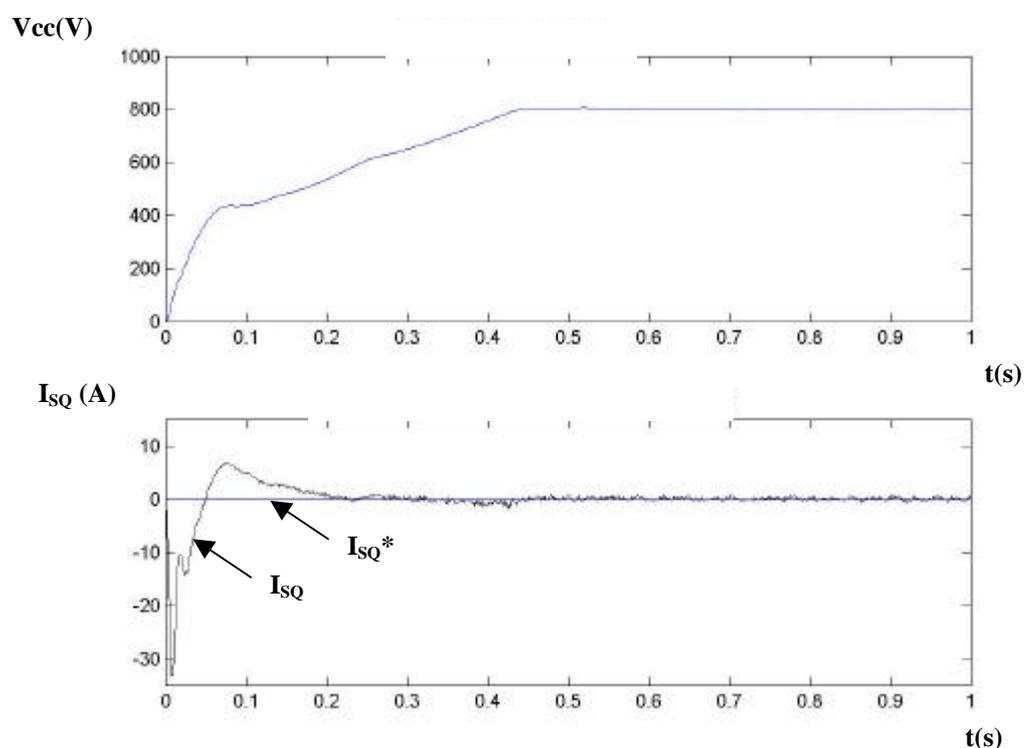
Figura 5.18 Diagrama de blocos de controle de potência reativa do lado da rede

Nas simulações realizadas com essa configuração, devido a não necessidade de controle de fluxo magnético, foram avaliados o controle do carregamento do barramento CC e do fator de potência do conversor do lado da rede, bem como o controle do conjugado (acompanhando as característica “ $T_e \times \omega_r$ ” ótima) e das componentes de corrente da máquina.

Nas figuras a seguir poderá ser percebida a boa resposta dada às técnicas de controle escolhidas, observando que depois das dificuldades iniciais do estabelecimento da tensão do barramento CC, todas as correntes são controladas

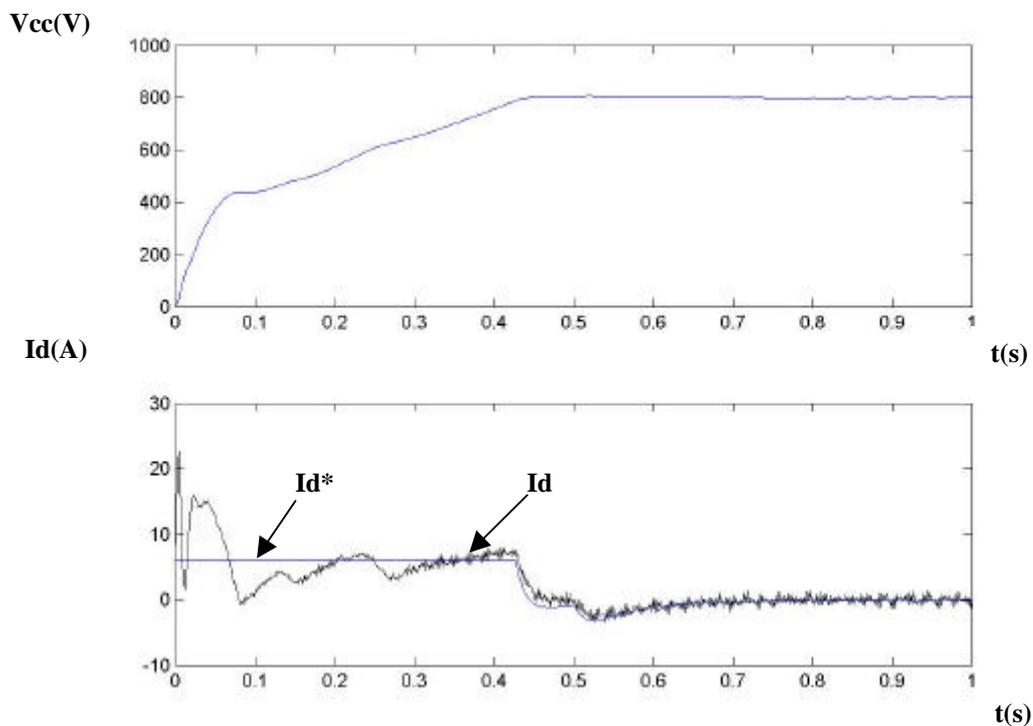
e também as metas de fator de potência unitário são alcançadas em poucas frações de segundos.

Na figura 5.19 poderá ser analisado o controle da corrente responsável pelo carregamento do capacitor.



**Figura 5.19** Resultado de simulação do estabelecimento do barramento CC diante do controle da corrente ativa

Na figura 5.20 observa-se que após o estabelecimento de  $V_{cc}$ , o fator de potência unitário do lado da rede é estabelecido .



**Figura 5.20** Resultado de simulação de controle da corrente reativa

Nas figuras 5.21 e 5.22 percebe-se o bom desempenho dos controles do conversor ligado do lado da máquina, visto que, as componentes de eixo direto e em quadratura das correntes são controladas. Após o estabelecimento de  $V_{cc}$ , é imposta a curva de desempenho ótimo da característica “ $T_e \times \omega_r$ ” da turbina.

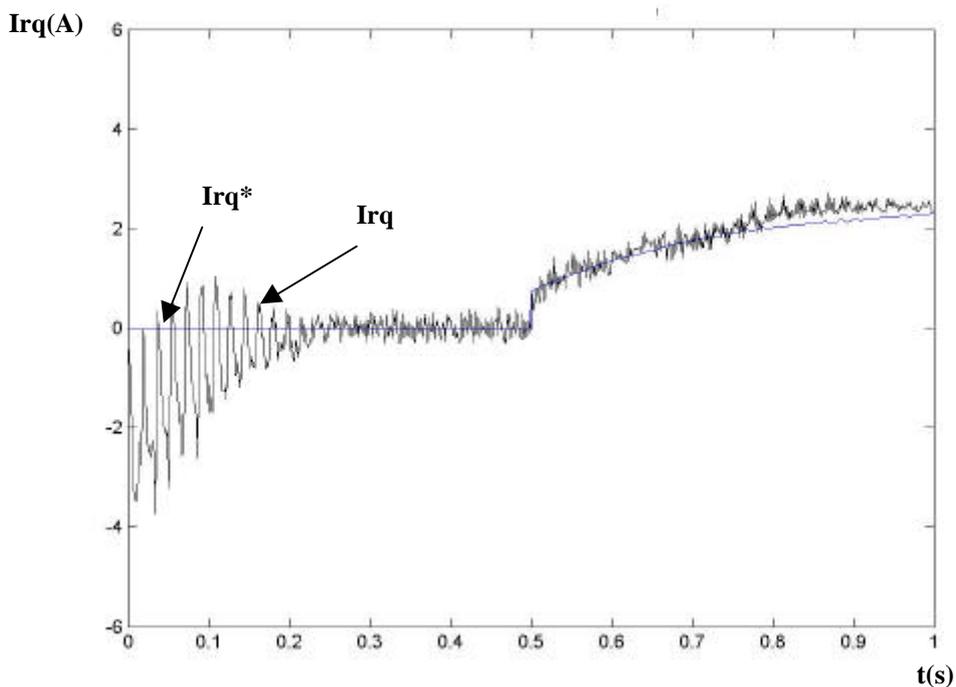


Figura 5.21 Resultado de simulação de controle em quadratura do lado da máquina

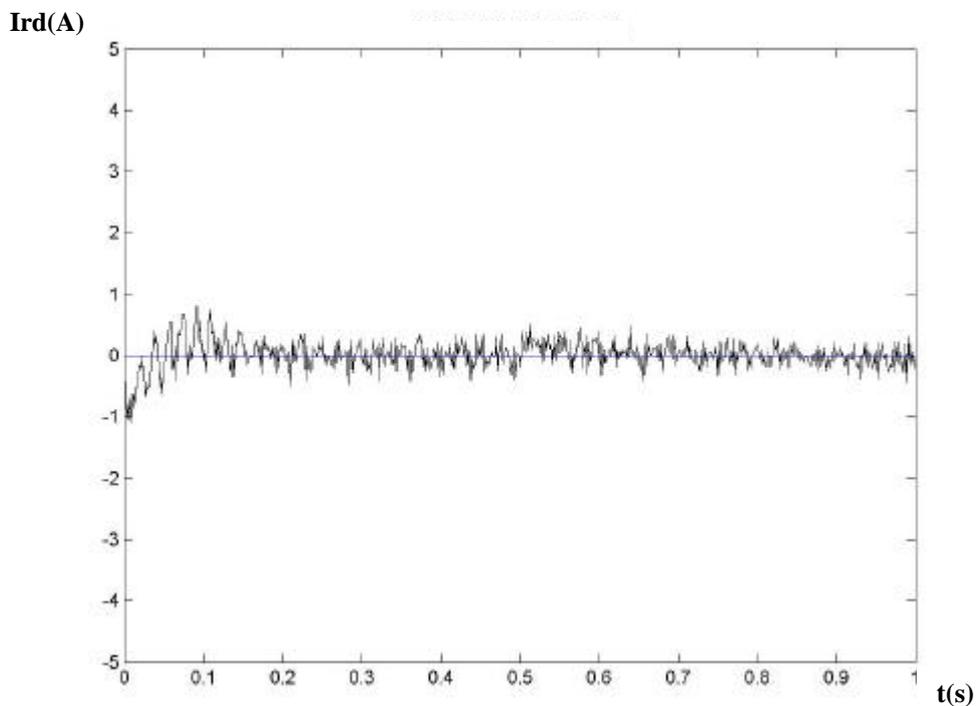


Figura 5.22 Resultado de simulação de controle da corrente reativa do lado da máquina

## Capítulo 6

### Conclusão

O incentivo do governo para novos acessantes no sistema elétrico brasileiro exige a realização de estudos. Esses estudos deverão dar respostas sobre os efeitos da conexão de aerogeradores na rede elétrica e no meio ambiente, e por fim subsidiarão as futuras normas.

Esse trabalho não teve como propósito avaliar os custos das instalações de turbinas eólicas no Brasil, assim como também não teve o objetivo de provar qual das tecnologias estudadas era a mais viável. As particularidades de cada topologia mostram que será preciso pesar os ganhos dos avanços tecnológicos com as características do ponto de conexão, assim como também pesar o retorno do investimento.

O desenvolvimento dos algoritmos de simulação, incluindo três das topologias existentes de uso de aerogeradores, assim como os seus controladores servirão, sim, para a análise futura do efeito da conexão de centrais eólicas em redes “fracas”. As estratégias de controle vetorial analisadas mostraram também a possibilidade do controle dos fluxos das potências ativa e reativa.

As respostas dos ensaios experimentais encontradas, consideradas satisfatórias, atestaram as boas escolhas de estratégias de controle, métodos de orientação e alimentação.

Alguns melhoramentos podem ser feitos, como um projeto mais sistemático dos ganhos dos controladores PI, a incorporação de elementos e restrições reais da rede elétrica.

## 6.1 Proposta de Trabalhos Futuros

Como continuação do trabalho desenvolvido, pode-se propor :

- A Simulação dos casos estudados introduzindo parâmetros e restrições da rede elétrica fraca;
- A melhoria dos ganhos dos controladores PI, elaborando projeto;
- A melhoria da inicialização do gerador isolado da rede;
- A análise de outras estratégias de controle, como, por exemplo, a estratégia DTC (Direct Torque Control);
- A análise harmônica dos sinais injetados na rede;
- A realização de ensaios com conversores totalmente controlados CA/CC/CA, incluindo a conexão à rede elétrica;
- A comparação do uso de outros métodos de estimação de fluxo;
- O aprimoramento da montagem realizada, como :
  - a) A inclusão da medição de conjugado, o que possibilitaria aferir indiretamente o fluxo;
  - b) A substituição do tacogerador CC por um encoder, reduzindo os problemas de ruído e má qualidade da medição em baixas velocidades ;

- c) A melhoria do projeto e/ou da confecção das placas, cabos, etc., reduzindo os problemas associados a ruídos e interferência eletromagnética.

## Referências Bibliográficas

- [Abdin and Xu, 2000] **Abdin,E.S. & Xu,W.** “*Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine – Induction Generator Unit*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 15, nº 1, p. 91-96, March 2000
- [Asher et al, 1996] **Asher, G.M., Clare, J.C. and Pena, R.** “*Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation*”, IEEE Proceedings Electronic Power Applications, v. 143, p. 231-241, May 1996
- [ANEEL I,2002] **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica, [http: www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br), Internet Site.
- [ANEEL, 2003] **ANEEL**, Agência Nacional de Energia Elétrica, “**WEBMASTER-NEWS**”,[http: www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br), Internet Site.
- [Battista e outros, 2000] **Battista, H., Puleston, P.F., Mantz,R.J. and Christiansen, C.F.** “*Sliding Mode Control of Wind Energy Systems with DOIG – Power Eddiciency and Torsional Dynamics Optimization*”, IEEE Transactions on Energy Conversion , v. 15, nº 4, p. 451-457, December 2000
- [Battista I e outros, 2000] **Battista, H. De, Mantz,R.J. and Christiansen, C. F.** “*Dynamic Sliding Mode Power Control of Wind Driven Induction Generators*”, IEEE Transactions on Power Systems, v. 15, nº 2, p. 728-734, May 2000

## Referências Bibliográficas

- [Barbosa e Watanabe, 2002 ] **Barbosa, P.G. e Watanabe, E.H.** “*Topologia de um statcom para sistemas de distribuição baseado na conexão série de conversores vsi quasi-multipulso*”, Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática, p. 1071-1077, Natal –RN, Setembro de 2002
- [Bundesverband Windenergie,2002] **Bundesverband Windenergie e.V.**, *Relatório Anual 2002*
- [CBEE,2002 ] **CBEE**, *Centro Brasileiro de Energia Eólica*, <http://www.eolica.com.br>, Internet Site.
- [Cardenas, 2001] **Cardenas, R., Penã, R. e Outros** “*A Cage induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters for Variable Speed Grid Conected Wind Energy Systems*”, Anais do 27<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Eletronics Society, p. 1376-1381, 2001
- [Chan e outros,2001] **Chan, T. F., Nigim, K. and Lai, L.L.** “*Voltage and Frequency Control of self-excited slip-ring Induction Generators*”, IEEE, 2001
- [Costa,2001] **Costa, A. C. A.** “*Metodologia de Análise e Projeto de Sistemas Híbridos Eólico-Solar-Bateria para Geração de Energia Elétrica*”, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, Outubro 2001
- [ Datta and Ranganathan,1999] **Datta, R. and Ranganathan, V.T.** “*Decoupled Control of Active and Reactive Power for a Grid-connected Doubly-fed Wound Rotor Induction Machine without Position Sensors*”, IEEE, p. 2623-2630, 1999
- [Datta and Ranganathan, 2002] **Datta, R. and Ranganathan, V.T.** “*Variable – Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine – A Comparison with Alternative Schemes*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 17, n° 3, p. 414-421, September 2002
- [DeDonker et al, 1988] **De Doncker, R. W. and Novotny, D.W.** “*The Universal Field Oriented Controller*”, Proceedings IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, p. 450-456, Pittsburgh, USA, 1988

## Referências Bibliográficas

- [DeDoncker et al, 2002] **De Doncker, R. W., Muller, S. and Deicke, M.** “*Doubly Fed Induction Generator Systems*”, IEEE Industry Applications Magazine, p. 26-33, May/June, 2002
- [EFEI,2003] **EFEI** “EFEI-NEWS”, [http: www. Energynews efei .br](http://www.Energynews.efei.br), Internet Site.
- [Ekanayake et al, 1999] **Ekanayake, J.B., Saad-Saoud, Z. and Lisbôa, M.L.** “*Melhoria da qualidade de energia em fazendas eólicas com o uso de statcom*”, Anais do XV SNPTEE, Grupo II, GPT 22, p.1-5, Foz de Iguaçu, PR, Outubro, 1999
- [Ekanayake, 2002] **Ekanayake, J.B.** “*Induction Generators for Small Hydro Schemes*”, Power Engineering Journal, p. 61-67, April 2002
- [Eletrobrás I, 2002] **ELETROBRÁS**,<http://www.eletronbras.gov.br>, Internet Site.
- [Eletrobrás, 2002] **ELETROBRÁS** “*Notícias do Setor Elétrico*”, <http://www.eletronbras.gov.br>, Internet Site.
- [ENERCON,2002] **Enercon** “*Enercon Technology*”, [http: www.enerconindia.net](http://www.enerconindia.net), Internet Site.
- [Freris, 1990] **Freris, L.L.** “*Wind Energy Conversion Systems*”, Prentice Hall, Londres, 1990.
- [Garcia and Hemerly,2002] **Garcia, F.M. & Hemerly, E.M.** “*Estimação de Fluxo e Velocidade de Rotor em Máquina de Indução em uma ampla faixa de Velocidade de Operação*”, Anais do XIV<sup>th</sup> Congresso Brasileiro de Automática, Natal – RN - Brasil, p. 1130-1135, Setembro 2002
- [GE Wind Energy, 2002] **GE Wind Energy** “*Description del Aeroogerador GE Wind Energy 1.5 s/sl*”, part. 1, p. 1-18, vers. 05, Maio 2002
- [Habetler, 1993] **Habetler,T.G.** “*A Space Vector Based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters*”, IEEE Transactions on Power Eletronics, v. 08, nº 01, p. 30-36, January 1993

## Referências Bibliográficas

- [Hammons et al, 2000] **Hamons, T. J., Boyer, J.C., Connors, S. R. et al** “*Renewable Energy Alternatives for Developed Countries*”, IEEE – Transactions on Energy Conversion, vol. 05, no. 04, p. 481-493, December 2000.
- [Hanse et al, 2001] **Hansen, L. H., Blaabjerg, F., Christensen, H. C. et al** “*Generators and Power Eletronics Tecnology for Wind Turbines*”, The 27<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE – Industrial Eletronics Society - IECON, p. 2000-2005, 2001
- [Heier, 1998] **Heier, S.** “*Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*”, *Translated by Rachel Waddington, Wiley Ed., England, 1998.*
- [Helle and Nielsen, 2001] **Helle, L. and Nielsen, S. M.** “*Comparison of Converter Efficiency in Large Variable Speed Wind Turbines*”, *IEE*, p. 628-634.,2001.
- [Jacobina et al, 2001] **Jacobina, C. B., Corrêa, M.B.R., Pinheiro, R.F., Silva, E.R.C. & Lima, A.M.N.** “*Modeling and Control of Unbalanced Phase Systems Containing PWM Converters*”, IEEE Transactions on Industry Aplications, v. 37, n° 06, p. 1807-1815, November/December 2001
- [Jangamshetti and Rau, 2001] **Jangamshetti, S.H. & Rau, V.G.** “*Optimum Siting of Wind Turbine Generators*”, IEEE Transactions on Energy Conservations, v. 16, n° 01, March 2001
- [Ladesma and Usaola, 2001] **Ladesma, P. Usaola, J.** “*Minimum Voltage Protections in Variable Speed Wind Farms*”, Paper accepted for IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, September 2001.
- [Lakin e outros, 1999] **Lakin, R.A., Atkinson, D.J. and Hopfensperger,B.** “*Stator flux oriented control of a cascade doubly-fed induction machine*”, IEEE Proceedings Electronic Power Aplications, Vol. 146, no. 06 November 1999.
- [Leidhold et al, 2002] **Leidhold, R. Garcia, G. e Valla, M.I.** “*Control para Máximo Rendiminto de Geradores Eólicos de Velocidad Variable, con Limitación de Velocidad y Potencia*”, Anais do XIV – Congresso Brasileiro de Automática, p. 3121-3126, Natal – RN, Set. 2002.

## Referências Bibliográficas

---

- [Lisbôa et al, 1999] **Lisbôa, M.L.V., Saoud, Z.S. & Ekanayke, J.** *“Melhoria da Qualidade de Energia em Fazendas Eólicas com o uso do STATCOM “*, XV SNPTEE, GPT/22, Outubro de 1999.
- [Lyra et al, 1995] **Lyra, R.O.C., Silva, S.R. & Cortizo, P.C.** *“Direct and Indirect Flux Control of na Isolated Induction Generator”*, IEEE Catalogue, nº 95TH8025, 0-7803-2423-4/95, 1995
- [Lyra et al, 1997] **Lyra, R.O.C., Silva, S.R. & Miranda, M.S.** *“Reactive Static Compensator for Wind Eletric Pumping System Using Induction Machinesr”*, IEEE , p. MC2-8.1-8.3, 1997
- [Mandelbaum,2002] **Mandelbaum, R.** *“Reap The Wild Wind”*, IEEE Spectrum, p. 35-39, October, 2002
- [McKenna, 2002] **McKenna, H. E. & Muljadi, E.** *“Power Quality Issues in a Hybrid Power System”*, IEEE Transactions on Industrial Aplications, v. 38, nº 03, p. 803-809, May/June 2002.
- [Miranda e outros,1997] **Miranda, M. S., Lyra, R.O.C. & Silva, S.R.** *“An Alternative Isolated Wind Eletric Pumping System Using Induction Machines”*, IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 14, nº 04, p. 1611-1616, December 1997.
- [Muljadi et al, 2001] **Muljadi, E., Hess, H.L. & Thomas, K.** *“Zero Sequence Method for Energy Recovery from Variable-Speed Wind Turbine Generator”*, IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 16, nº 01, p. 99-103, March 2001.
- [Nigim et al, 2001] **Nigim, K., Lai, L.L. and Chan, T.F.** *“Voltage and frequency control of self-excited slip-ring induction genarators”*, IEEE, p. 410-414, 2001.
- [Neves, 1999] **Neves, F.A.S** *“Acionamento de Alto Desempenho com Máquinas de Indução alimentadas em Tensão : Desenvolvimento de Novas Estratégias de Controle “*, Tese de Doutorado, UFMG, Belo Horizonte, 1999.

## Referências Bibliográficas

- [Nordex, 2002] **Nordex** “*Nordex Technology*”, [http: www.nordex.com](http://www.nordex.com), Internet Site.
- [Novotny and Lipo, 1996] **Novotny, D.W. e Lipo, T. A** “*Vector Control and Dynamics of AC Drives*”, Clarendon Press, Oxford, 1996.
- [Pena et al, 1996] **Pena, R., Clare, J.C. and Asher, G. H.** “*Doubly Fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters and Its applications to Variable-Speed Wind-Energy Generation*”, IEEE Proceedings on Eletronic Power Aplicationsvol. 143, no.03,p. 231-241, May 1996
- [Pena, 2001] **Pena, R., Clare, J.C., Asher, G. H. et al** “*A cage induction generator using back to back PWM converters for variable speed grid connected wind energy system*”, Anais do 27<sup>th</sup> IECON - IEEE Annual Conference, p. 1376-1381, 2001
- [Philips and Nagle, 1995] **Philips, C. L. and Nagle, H. T** “*Digital Control System Anlalysis and Design*”, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [Rezende e Rezek, 1997] **Rezende, J.T. and Rezek, A. J. J.** “*O Gerador de Indução como Alternativa de Geração de Energia Elétrica* “, XIV SNPTEE, GXH – GMR/16, 1997.
- [Rosas, 1997] **Rosas, P.A.C.** “*Conexão de Turbinas Eólicas à Rede Elétrica – Análise de Operação Normal e Transiente* “, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, Junho de 1999.
- [Rüncos, 2003] **Rüncos, F.** “*Gerador Eólico*”, WEG Máquinas, [http: www.weg.com.br](http://www.weg.com.br), Internet Site.
- [Silva and Lyra 1993] **Silva, S.R. and Lyra, R.O.** “*PWM Converter for Excitation of Induction Generators*“, Anais EPE, p. 174-178, Brighton, September, 1993.
- [Silva, 1995] **Silva, S.R.** “*Sistemas Elétricos de Alto Desempenho a Velocidade Variável : Estratégias de Controle e Aplicações* “, Tese para Concurso de Professor Titular, UFMG, Belo Horizonte, Março de 1995.

## Referências Bibliográficas

---

- [Stopa, 1997] **Stopa, M.M.** “*Controle do Motor de Indução por Orientação de Campo: Uma Implementação Utilizando um Conversor PWM Reversível*”, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, Março de 1997.
- [Seixas, 1988] **Seixas, P.F.** “*Commande Numérique d’une Machine Synchrone Autopilotée*”, These de Docteur, INPT, Toulouse, 1988.
- [Salameh and Safari, 1992] **Salameh, Z.M. & Safari, I.** “*Optimum Windmill – Site Matching*”, IEE Transactions on Energy Conversion, vol. 07, no. 04, p. 669-676, December 1992.
- [Sweet, 2002] **Sweet, W.** “*Reap the Wild Wind*”, IEEE - Spectrum, p. 34-39, October 2002.
- [Vestas, 2002] **Vestas** “*Vestas Technology*”, [http: www.vestas.com](http://www.vestas.com), Internet Site.
- [WEG, 2003] **WEG** “*WEG Motores*”, [http: www.weg.com.br](http://www.weg.com.br), Internet Site.
- [Ziyad e outros, 1996] **Salameh, Ziyad M. and Borowy, B. S.** “*Dynamic Response of a Stand-Alone Wind Energy Conversion System with Battery Energy Storage to a Wind Gust*”, IEE Transactions on Energy Conversion, vol. 12, no. 01, p. 73-78, March 1996.

# ANEXO 1

## Parâmetros da máquina e Considerações do Caso Estudado 1:

Potência = 5 hp;

Tensões Terminais = 220V/380V;

Frequência do Sistema = 60Hz;

Número de pólos=4;

Velocidade Mecânica Nominal = 1700 rpm;

Correntes Nominais = 14.5 A/ 11.2 A;

Parâmetros Referidos ao Estator :  $R_s=2.0$  ohms;

$R_r=1.9$  ohms;

$L_s=0.053$  H;

Constante de Inércia (J) =0.001 Kg.m<sup>2</sup>

Constante de Atrito =0.0018 N.m.s ( a 150 rad. ele/s);

## Parâmetros para a malha de controle :

Frequência de amostragem =4kHz;

Frequência de chaveamento =4kHz;

Tensão de referência do barramento CC =300 V;

Tensão da bateria= 96.V

Fluxo de rotor de referência 1 = 0.3 Wb;

Fluxo de rotor de referência 2 = 0.4 Wb ;

Ganhos dos Controladores PI :

- 1) Malha de Controle de Vcc :  $kp_{CC} = 1.$ ;  $ki_{CC} = 10.$ ;
- 2) Malha de Controle de Fluxo :  $kp_{fluxo} = 200.$ ;  $ki_{fluxo} = 2000.$ ;
- 3) Malha de Controle de Corrente :  $kp_{corr} = 5.$ ;  $ki_{corr}=3000.$

**Parâmetros do Sistema :**

Banco de capacitores = 470  $\mu$  F;

## ANEXO 2

### Parâmetros da máquina e Considerações do Caso Estudado 2:

Potência = 2 hp;

Tensões Terminais = 220V/380V;

Frequência do Sistema = 60Hz;

Número de pólos=4;

Velocidade Mecânica Nominal = 1720 rpm;

Correntes Nominais = 6.5 A/ 3.8 A;

Parâmetros referidos ao estator :  $R_s=4.08$  ohms;

$R_r=4.87$  ohms;

$L_{ls}=10.4$  mH;

$L_{lr}=18.5$  mH;

$M(L_m)=305$  mH;

Constante de Inércia (J) =0.017836 Kg.m<sup>2</sup>

Constante de Inércia da Turbina (J<sub>t</sub>) =0.5 Kg.m<sup>2</sup>;

Conjugado Nominal = 8 N.m;

Constante de Atrito =0.0018 N.m.s ( a 150 rad. ele/s);

### Parâmetros para a malha de controle :

Frequência de amostragem =5kHz;

Frequência de chaveamento =5kHz;

Tensão de referência do barramento CC =650 V;

Fluxo de rotor de referência = 0.8 Wb;

Ganhos dos Controladores PI :

1) Malha de Controle do Barramento CC :  $k_p_{cc}=7.5$ ;  $k_i_{cc}=125$ ;

2) Malha de Controle do Fluxo de Rotor :  $k_p_{fluxo}= 75$ ;  $k_i_{fluxo}= 7500$ ;

3) Malha de Controle de Corrente :  $k_p_{corr} = 139.21$ ;  $k_i_{corr} = 2.102 \times 10^4$ ;

4) Malha de Controle de Conjugado :  $k_p_{torque}=.03$ ;  $k_i_{torque}=.3$ ;

**Parâmetros do Sistema :**

Valor de pico da tensão de fase da rede =  $220 \cdot \sqrt{(2/3)}$ ;

Banco de capacitores = 2000  $\mu$  F;

## ANEXO 3

### Parâmetros da máquina e Considerações do Caso Estudado 3 :

Potência = 2 hp;

Tensões Terminais = 220V/380V;

Frequência do Sistema = 60Hz;

Número de pólos=4;

Velocidade Mecânica Nominal = 1720 rpm;

Correntes Nominais = 6.5 A/ 3.8 A;

Parâmetros referidos ao estator :  $R_s=4.08$  ohms;

$R_r=4.87$  ohms;

$L_{ls}=10.4$  mH;

$L_{lr}=18.5$  mH;

$M(L_m)=305$  mH;

Constante de Inércia (J) =0.017836 Kg.m<sup>2</sup>

Constante de Inércia da Turbina (J<sub>t</sub>) =0.5 Kg.m<sup>2</sup>;

Conjugado Nominal = 8 N.m;

Constante de Atrito =0.0018 N.m.s ( a 150 rad. ele/s);

---

**Parâmetros para a malha de controle :**

Frequência de amostragem =5kHz;

Frequência de chaveamento =5kHz;

Tensão de referência do barramento CC =800 V;

**Ganho dos Controladores PI :**

1) Malha de Controle da Tensão Vcc :  $k_p_{CC} = 5.$ ;  $k_i_{CC} = 1.5.$ ;

2) Malha de Controle do Conjugado :  $k_p_{torque} = 1.5.$ ;  $k_i_{torque} = 15.$ ;

3) Malha de Controle de Corrente do Retificador : $k_p_{corr\_ret} = 7.5.$ ;

$k_i_{corr\_ret} = 125.$ ;

4) Malha de Controle de Corrente do Inversor : $k_p_{corr\_inv} = 25.$ ;

$k_i_{corr\_inv} = 15000.$ ;

**Parâmetros do Sistema :**

Valor de pico da tensão de fase da rede = $220 \cdot \sqrt{2/3}$ ;

Banco de capacitores = 2000  $\mu$  F;