

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCELO HENRIQUE GRANZA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DO GERADOR
DE INDUÇÃO DE ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO EM
AEROGERADORES**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2014

MARCELO HENRIQUE GRANZA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DO GERADOR
DE INDUÇÃO DE ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO EM
AEROGERADORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ponta Grossa, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Voltolini

Coorientador: Prof. Dr. Renato Carlson

PONTA GROSSA

2014

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.42/14

G765 Granza, Marcelo Henrique

Implementação de um sistema de controle do gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo em aerogeradores. / Marcelo Henrique Granza. -- Ponta Grossa, 2014.

99 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Voltolini

Co-orientador: Prof. Dr. Renato Carlson

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

1. Energia eólica. 2. Conversor de frequência. 3. Máquinas elétricas de indução. I. Voltolini, Hélio. II. Carlson, Renato. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 621.38



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº 1/2014

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DO GERADOR DE INDUÇÃO DE
ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO EM AEROGERADORES**

por

Marcelo Henrique Granza

Esta dissertação foi apresentada às **16 horas** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA, com área de concentração em Controle e Processamento de Energia, linha de pesquisa em Controle e Processamento de Energia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Tellez Brunelli Lazzarin (UFSC)

Prof. Dr. Claudinor Bitencourt Nascimento (UTFPR)

Prof. Dr. Alessandro Goedel (UTFPR)

Prof. Dr. Hélio Voltolini (UTFPR) - *Orientador*

Prof. Doutor Renato Carlson (UTFPR)
Coorientador

Prof. Dr. Claudinor Bitencourt Nascimento (UTFPR)
Coordenador do PPGEE

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE REGISTROS
ACADÊMICOS DA UTFPR – CÂMPUS PONTA GROSSA

Dedico este trabalho a minha esposa
Andressa Gabardo, aos meus pais e as
minhas irmãs.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais heróis Ana Haas Granza e Wenceslau Granza que sempre me auxiliaram em tudo o que foi preciso não medindo esforços para que esse sonho se realizasse.

Agradeço as minhas irmãs Wilma Granza Madureira e Maristela Granza Brandalise, aos meus cunhados Paulo Roberto Madureira e Luciano Brandalise a quem considero eterna gratidão por serem meus segundos pais, sempre prestando toda ajuda possível, me orientando e me confortando em toda a vida. Agradeço a minha pequena sobrinha Ana Clara Granza Brandalise pelos momentos de descontração e alegria que me proporcionou.

Agradeço a minha esposa Andressa Gabardo que sempre esteve comigo em tudo que foi necessário, me dando força, consolo, alegria, motivação e amor. Você é a melhor companheira que alguém pode ter. Te amo!

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Hélio Voltolini pela ótima orientação, dedicação, atenção, sabedoria e principalmente pela oportunidade de desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço aos amigos Josmar Ivanqui e Pércio Miranda pela colaboração e participação no desenvolvimento do trabalho e dedicação de seus tempos.

Aos meus amigos de laboratório e a primeira turma do PPGEE pela longa batalha que realizamos junto.

Aos meus amigos Marcos Hirth, Ismael Burgardt e Jeferson Lima pelo companheirismo.

À Professora Marcella Ribeiro pelo auxílio prestado durante essa etapa e ao coordenador do PPGEE Claudinor Bitencourt.

A CAPES pelo auxílio financeiro prestado.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Quem inventou a distância nunca sofreu a
dor de uma saudade!
(MEDEIROS, Marta)

RESUMO

GRANZA, Marcelo Henrique. **Implementação de um sistema de controle do gerador de indução de rotor em gaiola de esquilo em aerogeradores.** 2014. 99 f. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

O objetivo deste trabalho é a implementação em simulação e experimental de um sistema eólico, desde a modelagem da turbina até a extração de potência para a rede baseado no conversor eletrônico *back-to-back*. É utilizado no sistema um gerador de indução com rotor em gaiola frente suas vantagens econômicas e facilidade de compra. O trabalho apresenta a estratégia de controle vetorial tanto do conversor do lado do gerador quanto do lado da rede. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do controle vetorial do gerador que utiliza apenas dois sensores de corrente e conta com uma estratégia de estimação de tensão nos terminais da máquina, estimação de fluxo no rotor e ainda estimação de velocidade, reduzindo o número de sensores para tal controle. Um protótipo foi desenvolvido em bancada para validar tais estratégias, onde os principais resultados são apresentados comprovando a estimação de tensão, a estimação de fluxo e de velocidade e a operação do sistema como gerador.

Palavras-chave: Energia Eólica, Conversor Back-to-back, Controle Vetorial, Gerador de Indução.

ABSTRACT

GRANZA, Marcelo Henrique. **Implementation of a control system to squirrel cage induction generator in wind systems**. 2014. 99 f. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2014.

The objective of this work is the implementation of wind system, from the modelling of wind turbine until the power extraction to the grid, based on back-to-back converter. It is used a squirrel cage induction generator because it has economic advantages and it is easily found commercially. The paper presents all control strategy to the grid converter and the generator converter. This work implements a vector control that use just two current sensors and it has a strategy to estimate the voltage terminals machine, rotor flux and the rotor speed, reducing the number of sensors for this control. A prototype was developed to validate these strategies. The main results are presented to demonstrate the estimations and the system operating as generator.

Keywords: Wind Energy System. Back-to-back converter. Vector Control. Induction Generator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais Elementos de um Sistema Eólico	14
Figura 2 - Configuração de Sistema Eólico com Imãs Permanentes	14
Figura 3 - Sistema Eólico com Gerador de Indução Duplamente Alimentado.....	15
Figura 4 – Configuração de um Sistema Eólico com Gerador de Indução Gaiola de Esquilo	16
Figura 5 - Turbina eólica de eixo vertical produzida pela empresa Vertéole – França	18
Figura 6 - Turbina Eólica de eixo horizontal produzida pela empresa Tecsis – Sorocaba – Brasil.....	19
Figura 7 – Modelo genérico de um sistema eólico	19
Figura 8 - Diagrama de blocos da Turbina, <i>gearbox</i> e acoplamentos.....	22
Figura 9 – Curvas de Potência da Turbina Eólica Simulada	23
Figura 10 - Coeficiente de Potência em função de Lambda.....	24
Figura 11 - Rastreamento de Máxima Potência	24
Figura 12 - Conversor Back-to-Back	26
Figura 13 - Conversor do Lado da Rede	27
Figura 14 - Eixos de Referência abc para Alfa e Beta.....	28
Figura 15 – Eixos de Referência $\alpha\beta$ para dq.....	29
Figura 16 - Diagrama de Blocos da Estratégia de Controle para a Rede.....	31
Figura 17 - Alinhamento do Vetor da Rede com o eixo V_{de}	32
Figura 18 – PLL para orientação da posição da rede.....	32
Figura 19 - Diagrama de blocos do PLL.....	33
Figura 20 - Diagrama de blocos para a corrente i_{de}	35
Figura 21 - Diagrama do Lugar das Raízes para a malha de corrente e resposta ao degrau	36
Figura 22 - Malha de Controle de Corrente	36
Figura 23 - Conversor do Lado da Rede	37
Figura 24 - Malha de Tensão	38
Figura 25 - Malha de Tensão Simplificada	38
Figura 26 - Malha de Controle de Tensão	39
Figura 27 - Conversor do lado da rede implementado em simulação	40
Figura 28 - Tensões de Linha da Rede	40
Figura 29 – Tensões $V_{\alpha e}$ e $V_{\beta e}$	41
Figura 30 - Tensões V_{de} e V_{qe}	41
Figura 31 - Posição Theta da Rede.....	42
Figura 32 - Dinâmica da Malha de Tensão	42
Figura 33 - Correntes i_{de} e i_{qe}	43
Figura 34 - Correntes i_{de} e i_{qe}	43
Figura 35 - Potência Ativa (KW) e Potência Reativa (KVAr)	44

Figura 36 - Sistema Eólico com o Conversor do lado do Gerador	46
Figura 37 - Filosofia do Controle Vetorial Direto.....	49
Figura 38 - Estimacão de Fluxo no Rotor pelo Método da Tensão	51
Figura 39 - Integrador com Filtro	52
Figura 40 - Orientaco do Fluxo no Rotor	52
Figura 41 - PLL para orientaco da posicão do fluxo no rotor.....	53
Figura 42 - Diagrama de Blocos para o Gerador.....	54
Figura 43 – Diagrama de blocos da malha de controle de corrente i_{qs} do gerador ...	58
Figura 44 - Malha da corrente i_{qs}	58
Figura 45 - Malha de Controle de Velocidade	60
Figura 46 - Malha de Velocidade.....	60
Figura 47 - Malha de Fluxo.....	61
Figura 48 - Malha de Fluxo.....	62
Figura 49 - Controle do Gerador Implementado em Simulaco	62
Figura 50 - Tensões de Linha Reconstruídas.....	63
Figura 51 - Correntes i_{abc}	63
Figura 52 - Fluxos alfa e beta no rotor	64
Figura 53 - Posico Theta do Fluxo no Rotor.....	64
Figura 54 - Fluxo dq no rotor	65
Figura 55 - Corrente i_d e i_q	65
Figura 56 - Fluxo no rotor e Torque Eletromagnético.....	66
Figura 57 - Velocidade Angular do Gerador.....	66
Figura 58 - Fluxo no Rotor.....	67
Figura 59 - Esquema Geral do Controle Vetorial do Sistema Eólico	68
Figura 60 - Sistema Simulado em Ambiente Matlab/Simulink.....	69
Figura 61 - Perfil de Velocidade de Vento.....	69
Figura 62 - Referência de Velocidade para o Gerador Eólico	70
Figura 63 - Tensão no Barramento CC	70
Figura 64 - Tensões de Fase da rede	71
Figura 65 - Correntes i_{abc} injetadas na rede.....	71
Figura 66 - Potência Ativa e Reativa injetadas na Rede	71
Figura 67 - Gerador de Induo acoplado a uma Máquina CC	73
Figura 68 - Sistema de Controle do Gerador de Induo	74
Figura 69 - Diagrama Elétrico do módulo utilizado no protótipo	74
Figura 70 - Módulo utilizado no Protótipo	75
Figura 71 - DSP utilizado no Protótipo	76
Figura 72 - Ambiente de Programaco do DSP com Matlab.....	77
Figura 73 - Circuito de Leitura e Condicionamento das Correntes.....	77
Figura 74 - Placa de Aquisico de Condicionamento das Correntes	78
Figura 75 - Circuito de Comando	79
Figura 76 - Placa de Comando.....	79

Figura 77 - Filtro RC.....	80
Figura 78 - Fontes Auxiliares.....	80
Figura 79 - Geração dos tempos T_a , T_b e T_c	82
Figura 80 - Corrente i_a na fase do gerador.....	83
Figura 81 - Correntes i_{α} e i_{β}	83
Figura 82 - Correntes i_d e i_q	84
Figura 83 - Estimação da Tensão V_{ab}	84
Figura 84 - Tensão de fase V_{an} estimada.....	85
Figura 85 - Dinâmica da malha de corrente i_d	86
Figura 86 - Fluxo no ψ_d e ψ_q no rotor.....	86
Figura 87 - Fluxo e posição no Rotor.....	87
Figura 88 - Degrau de fluxo.....	87
Figura 89 - Fluxos ψ_{α} e ψ_{β} durante o degra.....	88
Figura 90 - Teste com 0,5pu de velocidade.....	89
Figura 91 - Teste com 1pu de velocidade.....	89
Figura 92 - Dinâmica da malha de velocidade.....	90
Figura 93 - Esquema para operação do gerador.....	90
Figura 94 – Comportamento da corrente I1 para diferentes velocidades de operação do gerador.....	91
Figura 95 - Sistema montado em laboratório para operação do sistema como gerador.....	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	16
2 PANOMARA DA ENERGIA EÓLICA.....	18
2.1 ENERGIA EÓLICA.....	18
2.2 MODELOS DE TURBINAS EÓLICAS.....	18
2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DA TURBINA EÓLICA.....	19
2.4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	23
2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	24
3 SISTEMA DE CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE	26
3.1 MODELO DO CONVERSOR DO LADO DA REDE	26
3.1.1 Eixos de Referência.....	27
3.2 CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE.....	29
3.2.1 Modelo matemático do conversor em variáveis dq	30
3.2.2 PLL da tensão da rede.....	31
3.2.3 Malhas de Controle das Correntes I_d e I_q	34
3.2.4 Projeto do controle da malha de tensão VCC.....	37
3.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	39
3.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	44
4 SISTEMA DE CONTROLE DO GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA	45
4.1 MODELO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA EM VARIÁVEIS DQ	46
4.2 CONTROLE VETORIAL DO MOTOR DE INDUÇÃO	48
4.2.1 Obtenção do fluxo no rotor	49
4.2.2 Sistema de Controle do Conversor do Lado do Gerador	53
4.2.3 Projeto dos controladores das malhas de corrente.....	55
4.2.4 Método de estimação de velocidade.....	59
4.2.5 Projeto da malha de velocidade.....	59
4.2.6 Projeto da malha de fluxo	61
4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	62
4.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	67
5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	68
5.1 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	72
6 IMPLMETANÇÃO PRÁTICA DO SISTEMA	73
6.1 INVERSOR UTILIZADO NO PROTÓTIPO	74
6.2 PROCESSADOR DIGITAL DE SINAIS.....	75
6.3 CIRCUITO DE AQUISIÇÃO E CONDICONAMENTO DAS CORRENTES.....	77
6.4 CIRCUITO DE COMANDO	78

6.5 MEDIÇÃO E CIRCUITOS AUXILIARES	80
6.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	81
7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	82
7.1 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	92
8 CONCLUSÃO GERAL	94
REFERÊNCIAS.....	96
APÊNDICE A - Dados do sistema eólico	99

1 INTRODUÇÃO

A grande preocupação ambiental frente aos recursos naturais do planeta impulsiona o estudo de fontes alternativas para geração de energia elétrica. A energia eólica tem ganhado espaço uma vez que pode ser considerada limpa e de fonte inesgotável.

A energia eólica possui crescimento expressivo no contexto mundial. Segundo a *Brazil Energy* (2014) entre 2005 e 2010 a taxa de crescimento anual da geração eólica é de 27% ao ano. Já no Brasil tal geração representa apenas 1% da produção total de energia elétrica. Estima-se que em 2014 esse número salte para 5% e que até 2020 represente 7% da produção total do país.

O atlas do potencial eólico do Brasil revela que o potencial de geração do país de 143 mil MW com medições realizadas a 50m de altura, sendo um dado que revela a importância de tal matriz energética (BRAZIL ENERGY, 2014).

A geração através da energia eólica requer basicamente um sistema composto de uma turbina eólica, que é capaz de captar a energia contida nos ventos em energia cinética e um gerador elétrico, responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Os sistemas eólicos podem ser divididos em sistemas que operam a velocidade constante e ainda os que operam em velocidade variável.

Os sistemas que operam em velocidade constante são mais simples em relação aos de velocidade variável, uma vez que não requerem sistemas eletrônicos para controle de velocidade, porém não são capazes de extrair a máxima potência do sistema.

Os sistemas que operam em velocidade variável são mais complexos, uma vez que requerem sistemas eletrônicos para o controle de sua velocidade e o rastreamento de máxima potência do sistema.

Segundo Chen, Guerrero e Blaabjerg (2009) geralmente os principais elementos de um sistema eólico operando em velocidade variável são apresentados na Figura 1, onde é mostrada a turbina eólica, um sistema de engrenagens para elevação da velocidade (*gearbox*), o gerador, um conversor eletrônico, o transformador e a rede.

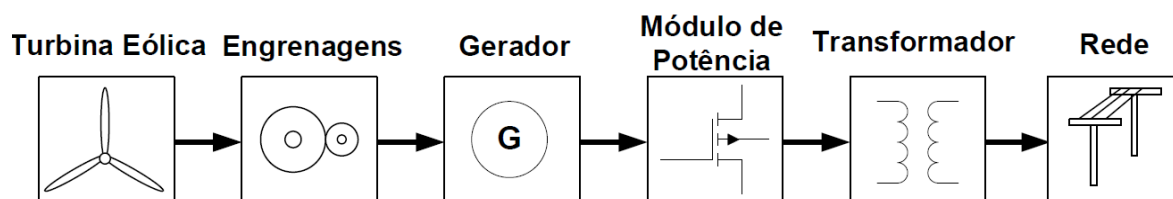


Figura 1 - Principais Elementos de um Sistema Eólico
 Fonte: Autoria Própria

Existem diferentes configurações de sistemas eólicos quanto ao tipo de gerador elétrico e a estratégias de controle.

Em Reis (2008) é apresentada uma configuração que emprega um gerador síncrono a ímãs permanentes (*PMSG – Permanent Magnet Synchronous Generator*). Tal configuração é apresentada na Figura 2. Nesta topologia o gerador é conectado a um retificador a diodos que é responsável pelo processamento de energia CA proveniente do gerador em energia CC. Após a etapa de retificação é inserido um conversor CC-CC elevador de tensão (*boost*) para adequar e controlar a tensão a ser conectada a etapa inversora do sistema. Um inversor PWM é responsável pelo processamento da energia CC em CA a ser entregue para a rede elétrica.

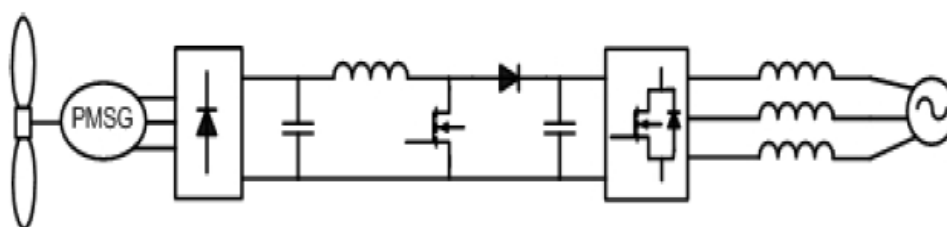


Figura 2 - Configuração de Sistema Eólico com Ímãs Permanentes
 Fonte: Reis (2008)

Outra configuração bastante usual em sistemas eólicos é a utilização de geradores de indução duplamente alimentados (*DFIG – Doubly Fed Induction Generator*). Em Bazzo (2007) e Voltolini (2007) são apresentados trabalhos desenvolvidos com este tipo de gerador. Nesta configuração o circuito do estator é conectado diretamente a rede. Entre o circuito do rotor e a rede é inserido um conversor bidirecional de energia (*back-to-back*), onde neste tipo de sistema o conversor processa em torno de 30% da potência nominal do gerador. A Figura 3 apresenta tal configuração.

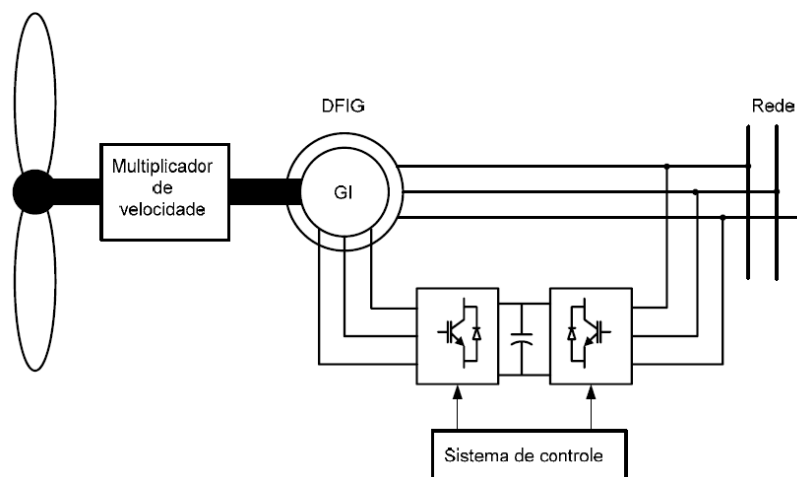


Figura 3 - Sistema Eólico com Gerador de Indução Duplamente Alimentado
Fonte: Voltolini (2007)

A configuração a ser apresentada nesta dissertação baseia-se no gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo (*SCIG – Squirrel Cage Induction Generator*) com operação em velocidade variável.

A escolha da máquina de indução trifásica com rotor em gaiola é vantajosa, devido a sua robustez, baixo custo, reduzida manutenção e ainda pode ser facilmente encontrada comercialmente (CAD,2000).

Alguns trabalhos com geradores de indução com rotor em gaiola de esquilo são desenvolvidos por Suebkinorn e Neammanee (2011), Senjyu, Ochi e Sekine (2006), onde são propostas as estratégias de controle para este tipo de gerador. Os elementos dessa configuração são apresentados na Figura 4, onde será focado o estudo deste trabalho.

Nesta configuração faz-se necessário a utilização de dois inversores compartilhando um barramento CC comum conhecido como conversor *back-to back*. Ambos os inversores operam com controle vetorial, sendo um inversor responsável pelo controle do gerador eólico, enquanto o outro é responsável pelo controle da tensão no barramento CC e também pela porção de potência ativa e reativa injetada na rede elétrica.

A turbina eólica impõe uma relação torque/velocidade ao eixo do gerador elétrico, onde o conversor do lado do gerador é responsável pelo controle da potência ativa e reativa do próprio gerador de indução.

O conversor do lado da rede é responsável pelo controle da tensão no elo CC podendo ser utilizado para controlar a potência ativa e reativa na rede elétrica.

Normalmente, o conversor do lado da rede realiza o controle da tensão no elo CC, mantendo o fator de potência unitário na rede.

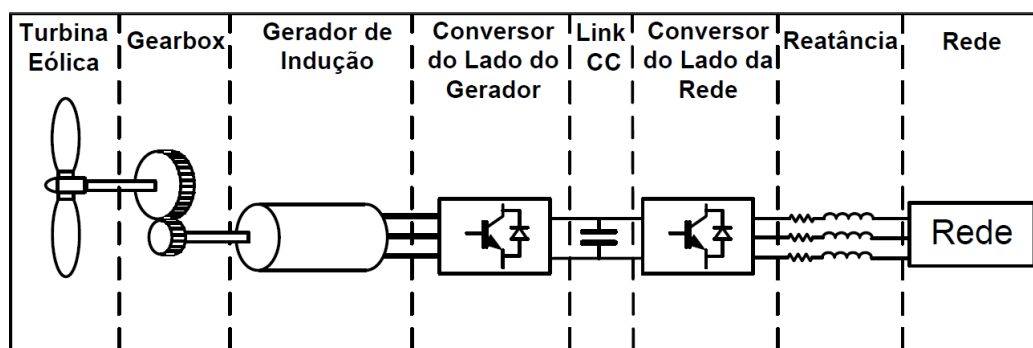


Figura 4 – Configuração de um Sistema Eólico com Gerador de Indução Gaiola de Esquilo
Fonte: Autoria Própria

O objetivo deste trabalho é a implementação em simulação e o desenvolvimento de uma bancada em laboratório de um sistema eólico baseado no gerador de indução de gaiola de esquilo.

A grande vantagem deste sistema é a robustez do gerador e sua grande facilidade de ser encontrado comercialmente. Ainda o desenvolvimento deste trabalho tem como principal contribuição um sistema que possui apenas dois sensores de corrente, sendo que o fluxo no rotor do gerador, as tensões de fase e linha, e a velocidade são todas estimadas, reduzindo em número significativo os sensores para tal aplicação.

Como desvantagem deste sistema pode-se citar a aplicação desse sistema para baixas potências, isto se explica porque tanto o gerador quanto o inversor utilizado devem ser igualmente dimensionados uma vez que o gerador de indução possui excitação única. Segundo o CRESEB (2009) pode-se considerar sistemas de baixas potência aqueles inferiores a 10kW.

1.1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O primeiro capítulo a ser abordado na dissertação é um breve panorama sobre a energia eólica. Ainda nesse capítulo será apresentada a modelagem aerodinâmica da turbina eólica, bem como os acoplamentos entre turbina-gearbox e

gearbox- gerador. Os principais resultados obtidos em simulação serão apresentados.

O segundo capítulo aborda o modelo e as estratégias de controle para o conversor eletrônico conectado do lado da rede e as transformadas de eixos de referência.

O terceiro capítulo retrará sobre o controle vetorial da máquina de indução com rotor em gaiola, onde serão apresentados às estratégias de controle da máquina.

O quinto capítulo trará resultados de simulação obtidos do sistema como um todo mostrando o rastreamento de máxima potência do sistema.

O sexto capítulo mostrará as partes do sistema implementado e a descrição de cada componente do hardware utilizado.

Por fim no último capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos com a construção da bancada.

2 PANOMARA DA ENERGIA EÓLICA

2.1 ENERGIA EÓLICA

A utilização de energia eólica é datada de 200 a.C para utilização de moagem de grãos e bombeamento de água. A energia dos ventos foi largamente utilizada para drenagem de água de regiões alagadas, sobre tudo nos países baixos.

Para a produção de energia elétrica, data-se de 1888, quando nos Estados Unidos um fazendeiro instalou um aerogerador de 12kW em corrente contínua para carregar baterias (CRESEB, 2007).

2.2 MODELOS DE TURBINAS EÓLICAS

As turbinas eólicas podem ser divididas pela posição de seu eixo, podendo ser horizontal ou vertical. A Figura 5 apresenta um aerogerador de eixo vertical, enquanto a Figura 6 retrata um aerogerador de eixo horizontal.



Figura 5 - Turbina eólica de eixo vertical produzida pela empresa Vertéole – França
Fonte: <http://www.verteole.fr/>



Figura 6 - Turbina Eólica de eixo horizontal produzida pela empresa Tecsis – Sorocaba – Brasil
Fonte: <http://www.tecsis.com.br/site/wind.php>

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DA TURBINA EÓLICA

Este item apresenta alguns conceitos relacionados à produção de energia mecânica a partir da energia cinética contida nos ventos, levando em consideração seus aspectos aerodinâmicos.

Um modelo genérico de uma turbina eólica é apresentado na Figura 7, onde o mesmo é composto por uma turbina eólica, uma caixa de engrenagens (*gearbox*) e um gerador de indução conectado à rede elétrica.

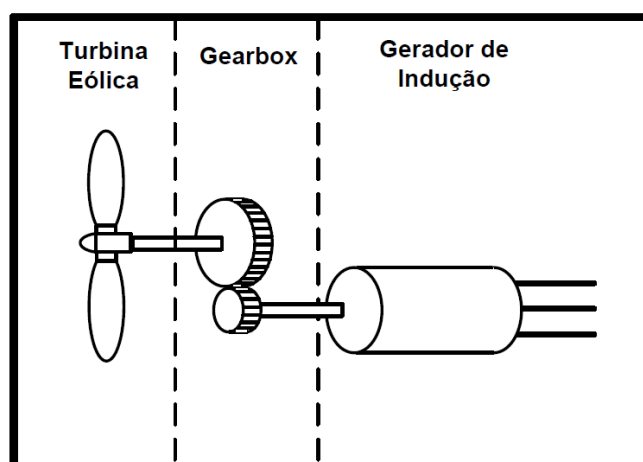


Figura 7 – Modelo genérico de um sistema eólico
Fonte: Autoria Própria

Entre a turbina-*gearbox* e *gearbox*-gerador estão presentes os acoplamentos mecânicos do sistema. Neste modelo é possível considerar os coeficientes de inércia e atrito distribuídos na turbina eólica, *gearbox* e seus respectivos acoplamentos.

Segundo o Heier (1998) e Iov et al. (2004) a energia cinética contida nos ventos pode ser equacionada por (1).

$$E_c = \frac{1}{2} \rho V_v^2 \quad (1)$$

Onde E_c é a energia cinética (J), ρ é a massa específica do ar (kg/m^3) e V_v é a velocidade do vento (m/s). Desta forma a potência mecânica extraída de uma turbina eólica pode ser apresentada em (2).

$$P_{\text{mec}} = \frac{1}{2} \rho V_v^3 C_p(\lambda, \beta) A \quad (2)$$

Onde P_{mec} é a potência mecânica extraída pela turbina (W), ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), V_v é a velocidade de vento (m/s), C_p é o coeficiente de potência que depende do ângulo de rotação das pás em relação ao seu eixo (ângulo de passo β) e da razão de velocidade de ponta de pá (λ) e A é área de varredura das pás (m^2).

A razão de velocidade de ponta de pá λ (*tip-speed-ratio*) relaciona a velocidade tangencial com a velocidade de vento incidente é apresentada em (3).

$$\lambda = \frac{\omega_T R}{V_v} \quad (3)$$

Onde ω_T é a velocidade da turbina (rad/s), R é o raio da turbina (m) e V_v é a velocidade do vento (m/s).

A eficiência de uma turbina eólica é fortemente influenciada pelo coeficiente de potência C_p , onde seu valor pode variar de 0 até 0,59 que é conhecido como limite de Betz. O coeficiente de potência é dado pela equação (4).

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda_i \quad (4)$$

Onde ψ_i é dado por:

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (5)$$

Os coeficientes c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 e c_6 são valores obtidos empiricamente para uma turbina moderna. O ângulo β é conhecido como ângulo de passo da turbina.

O torque produzido pela turbina é obtido pela relação entre a potência (Eq. 2) e a velocidade da turbina.

$$\frac{d\omega_T}{dt} = \frac{1}{J_T} (T_T - B_T \omega_T - T_{rT}) \quad (6)$$

Onde T_T é o torque produzido (Nm), J_T é o momento de inércia (kg/m^2), B_T é o atrito dinâmico (N), ω_T é a velocidade da turbina e T_{rT} é o torque resistente (Nm).

O sistema mecânico modelado consiste num conjunto de equações que representam o comportamento do *gearbox* e seus acoplamentos (*turbina-gearbox* e *gearbox-gerador*).

O acoplamento turbina-*gearbox* é modelado na expressão (7), onde ω_{gL} é a velocidade de entrada do *gearbox* (lado de baixa velocidade em rad/s), K_{gL} e B_{gL} são a rigidez e o amortecimento no eixo de baixa velocidade. O valor de K_{gL} deve ser suficientemente alto para evitar deflexão no acoplamento turbina-*gearbox*. O valor de B_{gL} normalmente aumenta de acordo com o valor de da rigidez K_{gL} .

$$T_{rT} = K_{gL} \int (\omega_T - \omega_{gL}) dt + B_{gL} (\omega_T - \omega_{gL}) \quad (7)$$

O modelo do *gearbox* é dado em (8) onde J_g é inércia (Kg/m^2), B_g é o atrito (N) e η é o rendimento do *gearbox*. T_{rH} é o torque resistente no lado de alta velocidade e “ a ” é a relação entre a alta e a baixa velocidade do *gearbox*.

$$J_g \frac{d\omega_{gL}}{dt} + B_g \omega_{gL} + \frac{\eta T_{rH}}{a} = T_{rT} \quad (8)$$

O acoplamento *gearbox*-gerador é dado em (9).

$$T_{rH} = K_{gH} \int (\omega_{gH} - \omega_r) dt + B_{gH} (\omega_{gH} - \omega_r) \quad (9)$$

O modelo apresentado anteriormente para o conjunto turbina, *gearbox* e acoplamentos foi simulado em ambiente Matlab/Simulink segundo o diagrama de blocos apresentado na Figura 8. Este diagrama representa a turbina e seu lado de baixa velocidade, os acoplamentos, e a saída de alta velocidade conectada ao gerador elétrico.

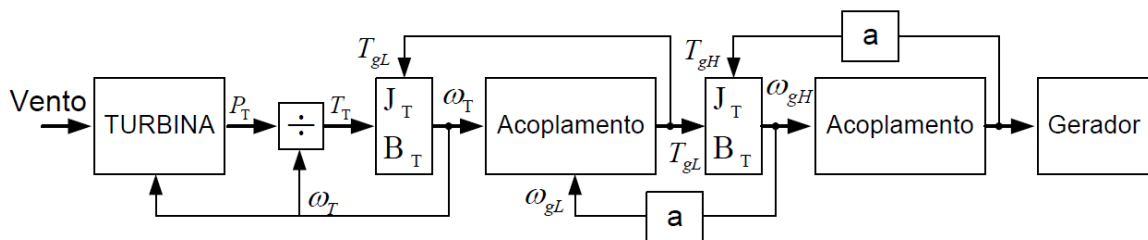


Figura 8 - Diagrama de blocos da Turbina, *gearbox* e acoplamentos
Fonte: Autoria Própria

O gerador elétrico disponível para o protótipo é de 3kW, desta forma foi dimensionada uma turbina eólica com uma potência de aproximadamente 3,5kW. Através da equação (2) é possível calcular o raio da turbina que é de aproximadamente 1,5m. Para este cálculo foi considerado que a turbina possui velocidade nominal de vento de 12m/s, um valor de C_p máximo de 0,48 e a massa específica do ar de $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Através da equação (3) pode-se obter o valor da velocidade nominal da turbina considerando um λ ótimo de 8,1 e velocidade de vento nominal de 12m/s. Desta forma o valor nominal da turbina é de 64,8 rad/s ou 618 rotações por minuto (rpm).

O sistema foi dimensionado de forma que o gerador terá velocidade máxima de 12% acima da velocidade síncrona. O gerador disposto para o projeto é de quatro polos, portanto possui uma velocidade síncrona de 1800 rpm e sua rotação máxima é de 2160 rpm.

Como a turbina possui velocidade de 618rpm e o gerador de 2160rpm a relação do *gearbox* é de aproximadamente 3,49 vezes, ou seja, a velocidade será elevada em tal razão, já o torque possui um decréscimo na mesma proporção desconsiderando as perdas atrito e eficiência do *gearbox*.

2.4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A seguir são apresentados alguns resultados de simulação, obtidos através do modelo da turbina eólica modelado na seção 2.2.

A Figura 9 demonstra as curvas de potência obtidas para diferentes velocidades de vento. Para cada velocidade de vento e velocidade angular da turbina existe um ponto ótimo de operação onde ocorre o ponto de máxima potência da turbina eólica.

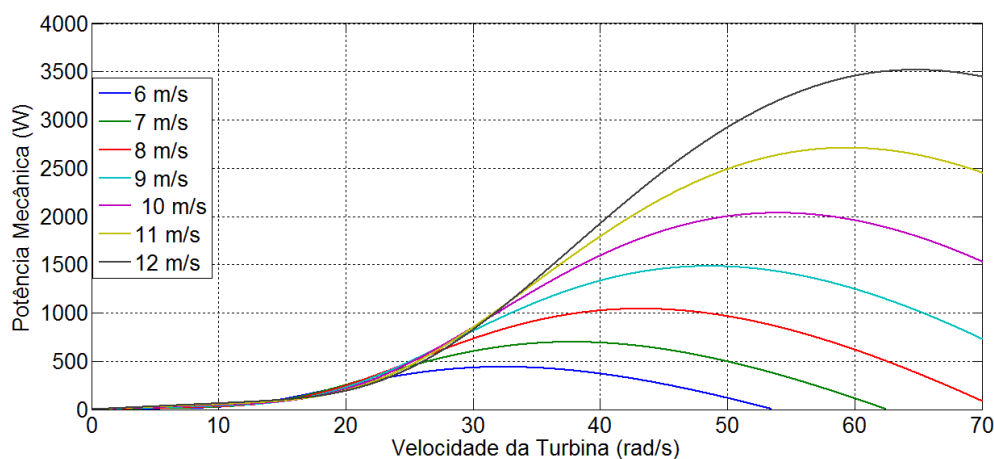


Figura 9 – Curvas de Potência da Turbina Eólica Simulada
Fonte: Autoria Própria

A Figura 10 demonstra as curvas do coeficiente de potência em função de λ para diversos ângulos de passo (β). Observa-se claramente que o valor máximo do coeficiente de potência é de 0,48 para um λ de 8,1 com ângulo de passo (β) igual a zero.

Para ocorrer a máxima extração de potência é necessário o rastreamento do ponto ótimo de operação que é conhecido na literatura como MPPT que provém do inglês *Maximum Power Point Tracking*, onde se define um ponto ótimo de operação para cada velocidade de vento (SUEBKINORN e NEAMMANEE, 2011).

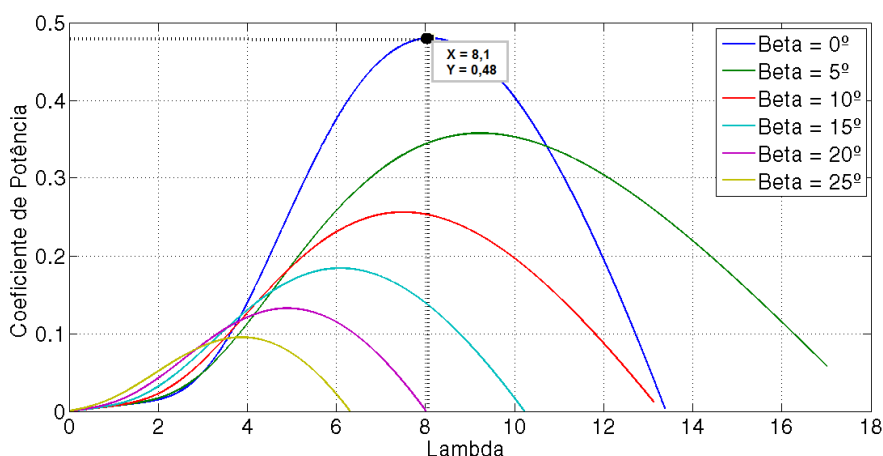


Figura 10 - Coeficiente de Potência em função de Lambda
Fonte: Autoria Própria

Desta forma é possível visualizar na Figura 11 a trajetória de máxima potência da turbina para os pontos de A até G. Desta forma quando ocorre uma variação de velocidade de vento o gerador elétrico deve ser controlado nas condições onde a máxima extração ocorra.

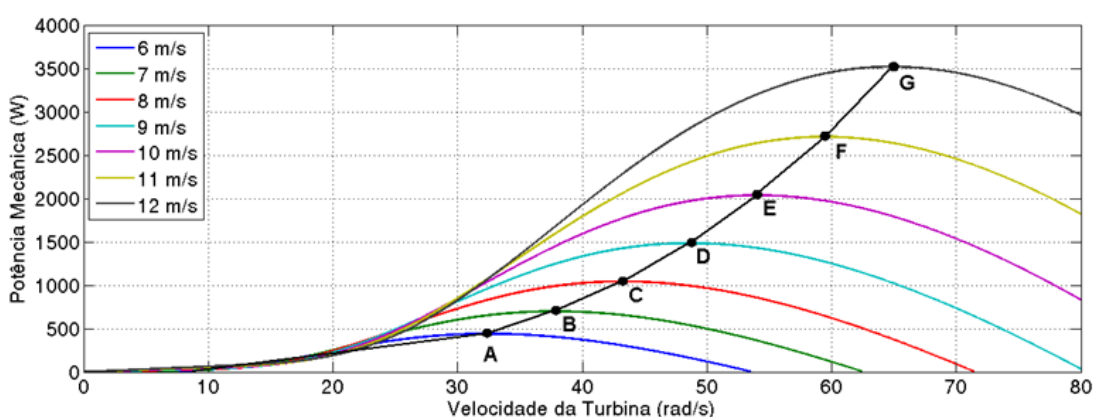


Figura 11 - Rastreamento de Máxima Potência
Fonte: Autoria Própria

2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as equações do modelo da turbina eólica levando em consideração seus aspectos aerodinâmicos e suas equações mecânicas, bem como o modelo do *gearbox* e seus acoplamentos.

Ao final foram apresentadas as principais curvas através da simulação do modelo, onde algumas conclusões foram obtidas em relação ao rastreamento de máxima potência. Observou-se que para ocorrer a máxima extração de potência, segundo a Figura 10, para diferentes velocidades de vento o ângulo de passo beta (β) deve ser igual a zero e ainda a razão de velocidade de ponta de pá (λ) deve ser igual a 8,1.

3 SISTEMA DE CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE

Neste projeto o conversor é responsável por 100% do processamento da energia, uma vez que o gerador em gaiola possui alimentação única no estator.

O conversor utilizado para o processamento da energia já é amplamente discutido na literatura e é conhecido como *back-to-back*, sendo que tal conversor possui dois inversores trifásicos compartilhando um barramento CC em comum, permitindo o fluxo bidirecional de energia.

O conversor conectado ao lado do gerador é responsável por controlar o fluxo de potência ativa e reativa no gerador de indução. Este conversor será chamado de conversor do lado do gerador. O outro conversor será designado como conversor do lado da rede e tem como função manter a tensão no barramento CC constante, bem como controlar o fluxo de potência ativa e reativa injetados na rede (SUEBKINORN e NEAMMANEE, 2011).

Este Capítulo apresenta a estratégia utilizada no controle do conversor do lado da rede, que utiliza a teoria dos eixos de referência dq . O controle vetorial é realizado orientando o vetor da rede com o eixo d . As estratégias de controle deste conversor são baseadas em Carlsson (1998).

A Figura 12 representa a configuração do conversor *back-to-back*, ao qual apresenta os dois inversores trifásicos compartilhando um barramento CC em comum.

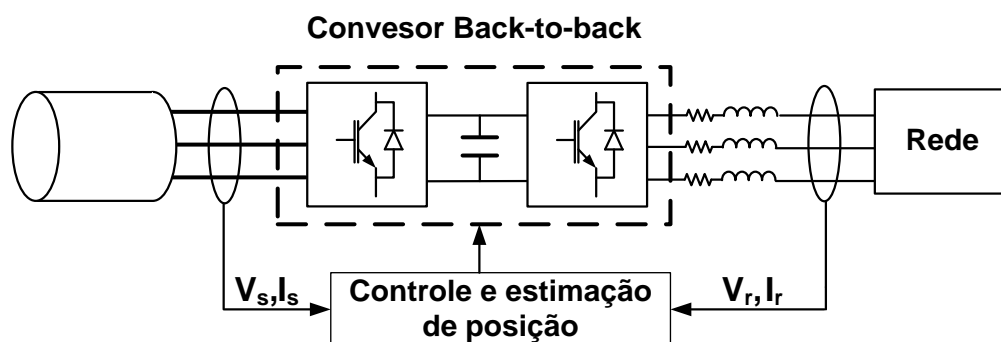


Figura 12 - Conversor Back-to-Back
Fonte: Autoria Própria

3.1 MODELO DO CONVERSOR DO LADO DA REDE

O conversor apresentado neste capítulo é designado como conversor do lado da rede, cuja configuração básica é mostrada na Figura 13.

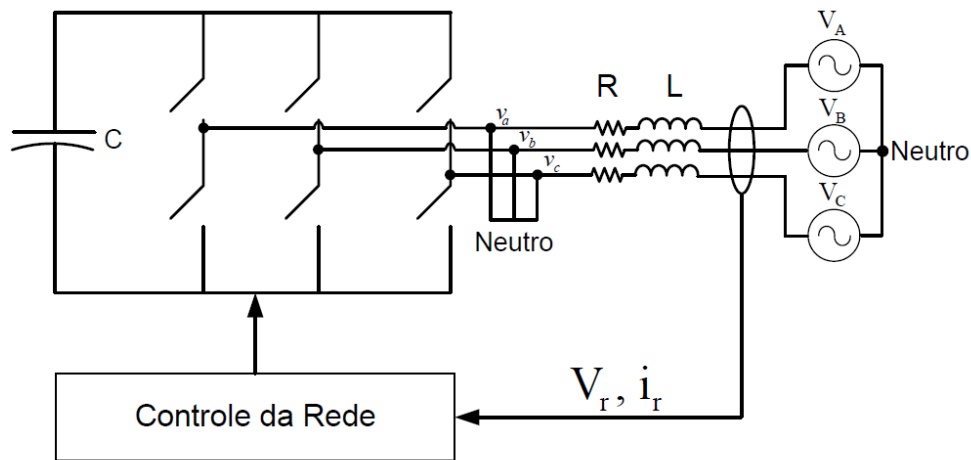


Figura 13 - Conversor do Lado da Rede
Fonte: Autoria Própria

Para o conversor apresentado na Figura 13 - Conversor do Lado da Rede, podem-se obter as seguintes equações de tensão.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

Estas equações representam o modelo do conversor para o lado da rede em variáveis abc , o que exige uma complexidade bastante elevada para elaborar uma estratégia de controle, uma vez que existe o acoplamento entre as fases, sendo conveniente realizar a mudança de eixos de referência do sistema. A mudança dos eixos de referência é tratada no item a seguir, onde tanto para conversor da rede quanto para o conversor do gerador, as técnicas de transformação de eixos são as mesmas.

3.1.1 Eixos de Referência

Neste item serão discutidos os eixos de referências utilizados nas estratégias de controle. Inicialmente, é realizada uma transformação dos eixos abc para um sistema bifásico girante, denominadas de alfa (α) e beta (β). Esta

transformação pode ser aplicada para tensão, correntes, e ainda, potências (BOSE, 2000).

A Figura 14 mostra o eixo de referência *alfa-beta* e o sistema de referência *abc* das tensões de fase da rede. Através desse diagrama fasorial é possível estabelecer a relação de transformação dos eixos *abc* para alfa e beta. Esta transformação é conhecida como Transformada de Clarke, apresentada em (11).

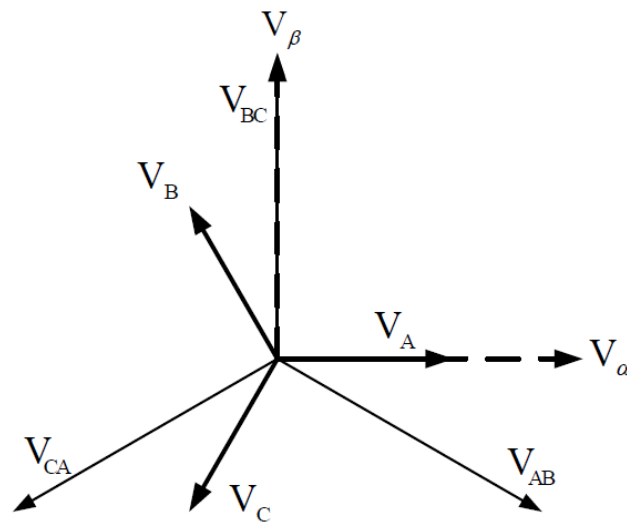


Figura 14 - Eixos de Referência abc para Alfa e Beta
Fonte: Autoria Própria

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

A transformada inversa de Clarke é apresentada em (12), onde a partir de um sistema bifásico girante é possível obter um sistema em variáveis *abc*.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta-120^\circ) & \sin(\theta-120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta+120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Uma vez realizada a transformada de Clarke, a segunda transformada de eixos de referência é conhecida como transformada de Park e, neste caso, o sistema de eixos de referência possui velocidade ω_e . A denominação tradicional

utilizada para os novos eixos de referência são “dq” que se referem a um eixo direto e outro em quadratura. O diagrama fasorial da Figura 15 apresenta o sistema de eixos estacionários *alfa-beta* e o sistema de referências *dq* girantes.

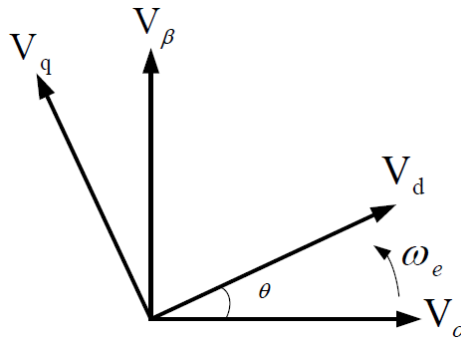


Figura 15 – Eixos de Referência $\alpha\beta$ para dq
Fonte: Autoria Própria

Segundo o diagrama fasorial da Figura 15 é possível estabelecer a relação dos eixos *alfa-beta* para *dq* apresentada a seguir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha \cos(\theta) + V_\beta \sin(\theta) \\ -V_\alpha \sin(\theta) + V_\beta \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

A transformada inversa que realiza a transformação de *dq* para *alpha-beta* é apresentada em (14).

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_d \cos(\theta) - V_q \sin(\theta) \\ V_d \sin(\theta) + V_q \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.2 CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE

Nesse item será apresentado o modelo do conversor do lado da rede em variáveis *dq*, bem como o equacionamento das potências ativa e reativa. Em um segundo momento as estratégias de controle para tal conversor serão apresentadas.

3.2.1 Modelo matemático do conversor em variáveis dq

Utilizando os conceitos de eixos de referência discutidos no item 3.1.1 permite estabelecer as equações de tensão em variáveis dq apresentadas em (15), sendo adicionado o subscrito “e” junto as variáveis dq para denotar o lado da rede.

$$\begin{cases} v_{de} = R i_{de} + L \frac{di_{de}}{dt} - \omega_s L i_{qe} + v_{dcn} \\ v_{qe} = R i_{qe} + L \frac{di_{qe}}{dt} + \omega_s L i_{de} + v_{qcn} \end{cases} \quad (15)$$

As potências ativa (P_e) e reativa (Q_e) podem ser calculadas levando em consideração os eixos dq_e e são apresentadas em (16) (VOLTOLINI,2007).

$$\begin{cases} P_e = \frac{3}{2} (V_{qe} i_{qe} + V_{de} i_{de}) \\ Q_e = \frac{3}{2} (V_{qe} i_{de} - V_{de} i_{qe}) \end{cases} \quad (16)$$

Para que seja possível o controle da potência ativa e reativa é necessário o controle sobre as correntes i_{qe} e i_{de} . Desta forma, o vetor da tensão foi alinhado com o eixo de referência d , tal que:

$$\begin{cases} V_{de} = V_e \\ V_{qe} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Segundo a orientação dos eixos de referência (17), as equações da potência ativa e reativa apresentadas em (16) podem ser definidas a seguir. Em (18) fica evidente o desacoplamento da potência ativa e reativa, onde a potência ativa é controlada pela corrente i_{de} , enquanto a corrente i_{qe} controla a potência reativa.

$$\begin{cases} P_e = \frac{3}{2} V_e i_{de} \\ Q_e = -\frac{3}{2} V_e i_{qe} \end{cases} \quad (18)$$

Através das equações apresentadas em (15) é possível estabelecer as estratégias de controle para o conversor do lado da rede. A Figura 16 apresenta o diagrama de blocos que representa a metodologia adotada para o controle, no qual são realizadas as leituras das tensões de linha, correntes nas fases da rede e ainda a medição da tensão no barramento CC. O projeto dos controladores e o cálculo da posição e módulo da tensão da rede serão apresentados a seguir.

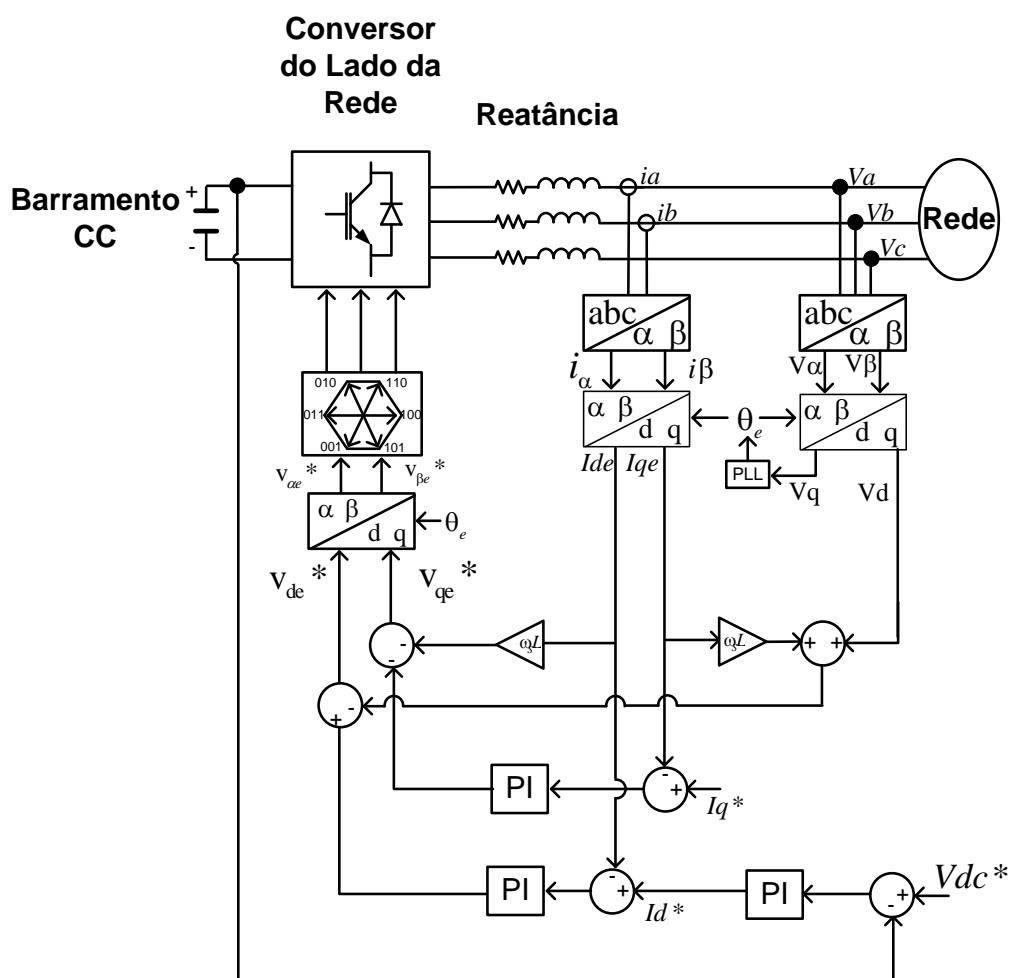


Figura 16 - Diagrama de Blocos da Estratégia de Controle para a Rede
Fonte: Autoria Própria

3.2.2 PLL da tensão da rede

Como convenção o eixo de referência alfa foi alinhado com o eixo da tensão V_{an} da rede para a realização da Transformada de Clark. A Figura 17 apresenta o diagrama fasorial da orientação.

O cálculo da posição e módulo da tensão da rede são realizados através de uma malha de detecção de fase conhecido como *Phase Locked Loop (PLL)*.

Segundo Gomes (2007) uma estrutura *PLL* é uma malha de controle realimentada, onde tal malha consiste na sintetização de uma senóide, normalmente com amplitude unitária e frequência da componente fundamental.

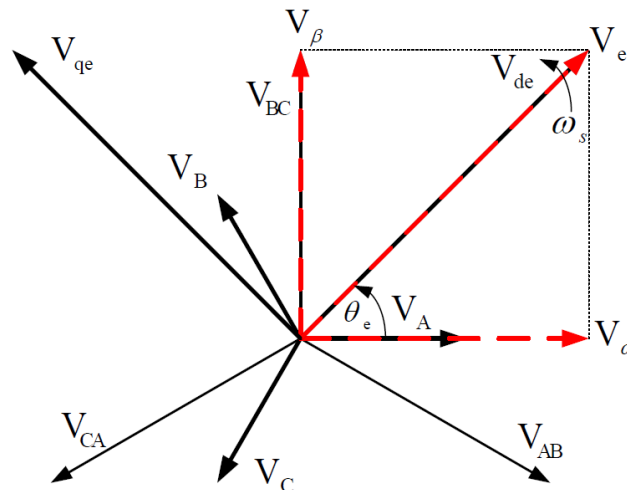


Figura 17 - Alinhamento do Vetor da Rede com o eixo V_{de}
Fonte: Autoria Própria

O diagrama da Figura 18 apresenta a estrutura do *PLL* utilizada para detecção da posição da tensão da rede.

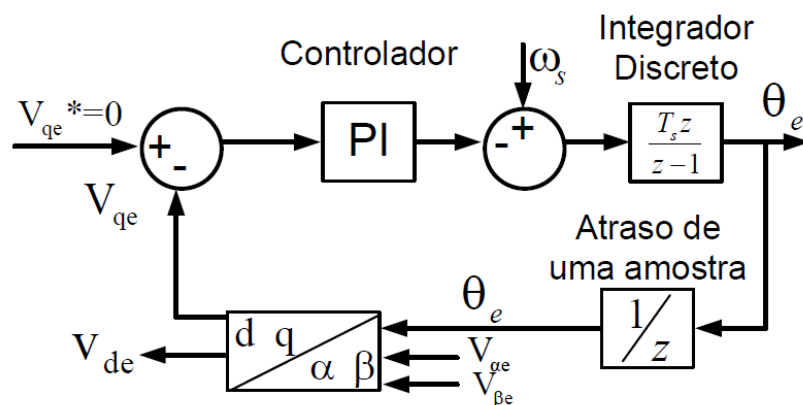


Figura 18 – PLL para orientação da posição da rede
Fonte: Autoria Própria

O cálculo para todos os controladores apresentados neste trabalho foram realizados no tempo contínuo, apesar de o sistema estar implementado no formato discreto. Para todas as malhas apresentadas, foi utilizado o controle proporcional

integrativo (PI). O modelo do controlador PI utilizado é apresentado em (19) no formato pólo-zero. O método utilizado para o projeto dos controladores foi o método do lugar das raízes.

$$G_{PI}(s) = \frac{K_p (s + Z_c)}{s} \quad (19)$$

Os cálculos dos ganhos para o *PLL* foram realizados levando em consideração um tempo de acomodação dez vezes maior que o tempo de acomodação da malha de corrente que será apresentada no próximo item. Desta forma, o tempo de estabilização adotado foi de 0,2s para o critério de 5% e ainda um fator de amortecimento $\xi = 0,707$. A constante elétrica do sistema é baseada nos valores da reatância conectada a rede e são apresentados no apêndice A do trabalho.

O controlador PI para o *PLL* fica no formato apresentado abaixo.

$$G_{PI_PLL}(s) = \frac{6,2153(s + 384,6)}{s} \quad (20)$$

A representação em blocos da malha de detecção de fase é apresentada na Figura 19.

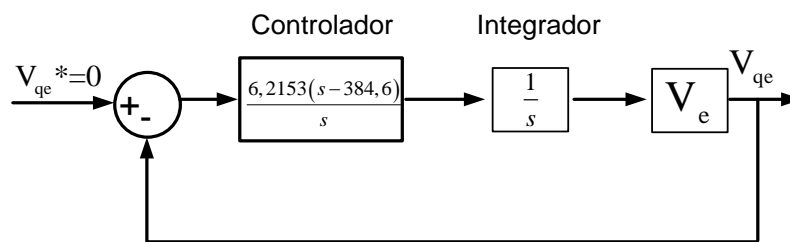


Figura 19 - Diagrama de blocos do *PLL*
Fonte: Autoria Própria

A dinâmica da malha de controle do *PLL* será apresentada ao final deste capítulo.

3.2.3 Malhas de Controle das Correntes i_d e i_q

O projeto dos controladores de corrente pode ser realizado obtendo as funções de transferências (FTs) baseada nas equações apresentadas em (15), abaixo segue o equacionamento.

As funções de transferências para as correntes são i_{de} e i_{qe} são iguais, sendo apresentado apenas o projeto para uma delas (i_{de}).

$$G_{idq}(s) = \frac{i_{de}(s)}{V'_{de}(s)} = \frac{i_{qe}(s)}{V'_{qe}(s)} \quad (21)$$

Desta forma tem-se a FT para a corrente i_{de} apresentada em (22).

$$\begin{aligned} v_{de} &= Ri_{de} + L \frac{di_{de}}{dt} - \omega_s Li_{qe} + v_{dcn} \\ v_{de} &= i_{de} (R + Ls) - \omega_s Li_{qe} + v_{dcn} \\ \frac{i_{de}}{v_{de} + \omega_s Li_{qe} - v_{dcn}} &= \frac{1}{Ls + R} \\ \frac{i_{de}}{V'_{de}} &= \frac{1}{Ls + R} \end{aligned} \quad (22)$$

Onde:

$$\begin{cases} v_{dcn} = v_{de} + \omega_s Li_{qe} - V'_{de} \\ v_{qcn} = \omega_s Li_{de} - V'_{qe} \end{cases} \quad (23)$$

Os termos v_{dcn} e v_{qcn} são as tensões de referência que serão aplicadas pelo conversor. Os termos $(\omega_s Li_{qe})$ e $(\omega_s Li_{de})$ são tensões que devem ser compensadas na malha de controle.

O diagrama de blocos completo para a malha de corrente i_{de} é apresentado na Figura 20 (a), o termo $(V_{de} + \omega Li_q)$ pode ser compensado pelo controlador, desta forma a malha de corrente por ser simplificada a Figura 20 (b). O mesmo diagrama é valido para a corrente i_{qe} .

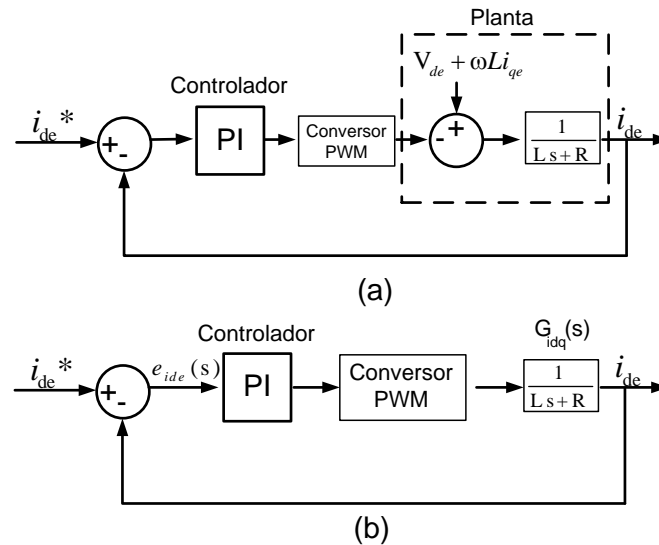


Figura 20 - Diagrama de blocos para a corrente i_{de}
Fonte: Autoria Própria

O ganho do conversor é dado por $G = (2/3)V_d \cos(\pi/6)V_{cc} = 0.577V_{cc}$ (BOSE,2000). Para uma tensão V_{cc} de 400V o ganho do conversor é de 230,8.

O projeto do controlador de corrente é realizado no domínio "s". Foi utilizado para o projeto de todos controladores a técnica do lugar das raízes.

Os requisitos de projeto para a malha de corrente são baseados nos valores da reatância conectados a rede, os valores são apresentados no apêndice A.

A constante de tempo elétrica L/R possui valor de 0,1s. Desta forma o projeto foi calculado para ter um tempo de acomodação de 0,02s para o critério de 5% (cinco vezes mais rápido do que a constante elétrica) e um fator de amortecimento $\xi = 0,707$.

Para o projeto do controlador PI foi utilizado a ferramenta *sisotool* do *Matlab*. Nesta ferramenta é possível estabelecer as especificações de projetos desejados. Para a malha de corrente foi estabelecida o fator de amortecimento $\xi = 0,707$ e o tempo de acomodação de 0,02s.

A Figura 21 apresenta o diagrama do lugar das raízes para a malha de corrente e a resposta ao degrau para o PI projetado. Nesta figura pode-se observar a área para posicionamento dos polos e zeros em malha fechada.

Para atender as especificações foi alocado um zero arbitrário em -200 com um fator de amortecimento de 0,707. Observa-se que com estes valores o tempo de acomodação foi de 0,02s assim como projetado.

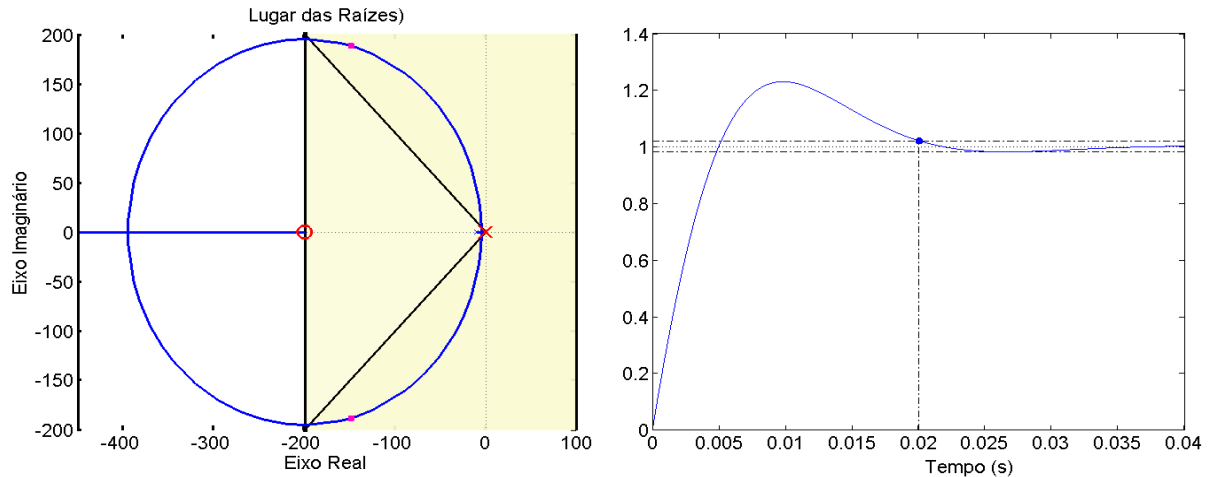


Figura 21 - Diagrama do Lugar das Raízes para a malha de corrente e resposta ao degrau
Fonte: Autoria Própria

Para esta malha o tempo da frequência natural foi de aproximadamente 280 rad/s. Com a alocação do zero em -200 e com base nos critérios de projeto, foi encontrado um ganho proporcional K_p de 2,8641 e um zero $Z_c = -200$. Para os demais projetos de controle, a mesma metodologia foi utilizada.

O formato polo-zero do PI para controle das correntes i_{de} e i_{qe} é apresentado em (24).

$$G_{idq}(s) = 2,8641 \left(\frac{s+200}{s} \right) \quad (24)$$

O diagrama de blocos para a malha de corrente com o controlador PI calculado é apresentado na Figura 22.

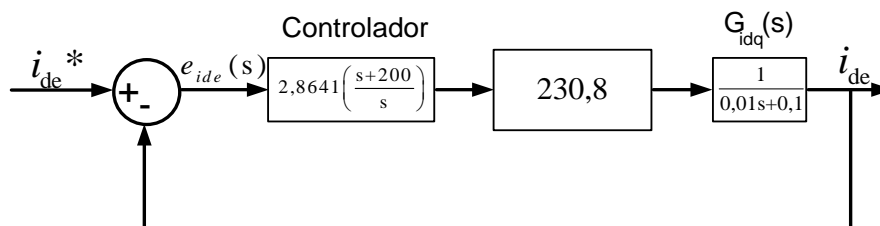


Figura 22 - Malha de Controle de Corrente
Fonte: Autoria Própria

Ao final do capítulo serão apresentados os resultados da dinâmica da malha de controle de corrente.

3.2.4 Projeto do controle da malha de tensão VCC

A malha de controle da tensão no barramento CC é obtida através da potência transferida entre os conversores. Se o sistema for considerado ideal, ou seja, sem perdas, a potência ativa injetada na rede deve ser igual à potência no barramento CC. A potência ativa é definida na equação (18), enquanto a potência no barramento CC pode ser obtida segundo a análise da Figura 23.

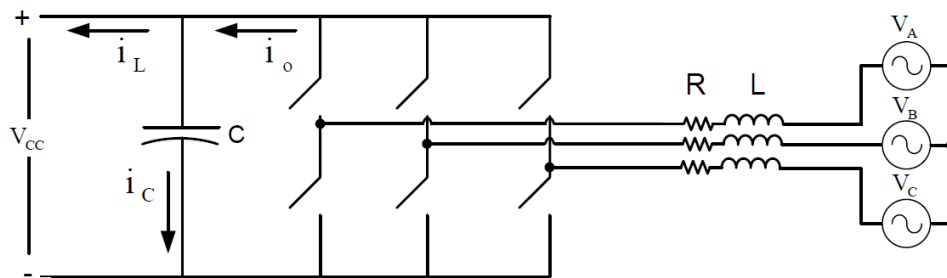


Figura 23 - Conversor do Lado da Rede
Fonte: Autoria Própria

A potência no barramento CC é definida em (25).

$$P_e = V_{cc} i_o \quad (25)$$

Considerando um sistema ideal tem-se que:

$$P_e = V_{cc} i_o = \frac{3}{2} V_{de} i_{de} \quad (26)$$

Onde:

$$i_o = i_L + i_C \quad (27)$$

Substituindo (27) em (26):

$$i_L + i_C = \frac{3}{2} \frac{V_{de} i_{de}}{V_{cc}} \quad (28)$$

Desta forma pode-se chegar à equação de controle da tensão do barramento CC apresentada em (29).

$$V_c = \frac{1}{C_s} \left(\frac{3}{2} \frac{V_{de} i_{de}}{V_{cc}} - i_L \right) \quad (29)$$

Pode-se observar na equação (29) que o controle da tensão no barramento CC pode ser feito pela corrente i_{de} que controla a potência ativa do sistema. Considerando que a malha de tensão possui uma dinâmica muito mais lenta que a malha de corrente anteriormente explicada, pode-se obter o diagrama de blocos da Figura 25.

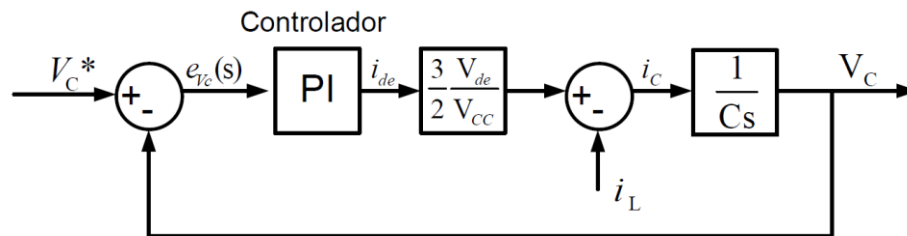


Figura 24 - Malha de Tensão
Fonte: Autoria Própria

Quando o sistema está em regime permanente o controlador proporcional integrativo compensa o efeito da corrente i_L , podendo a malha de tensão ser simplificada como mostrado na Figura 25.

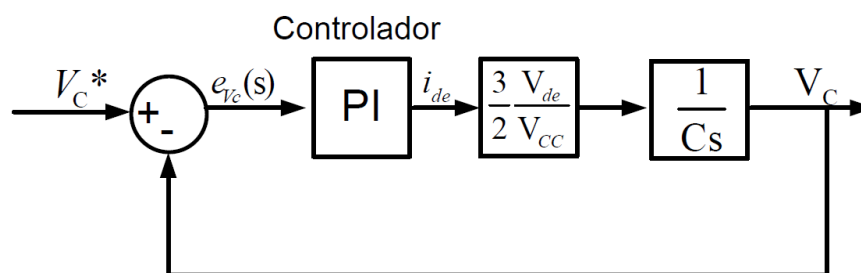


Figura 25 - Malha de Tensão Simplificada
Fonte: Autoria Própria

Os requisitos para projeto da malha de tensão foram definidos a partir da malha de corrente, como já mencionado, a malha de tensão deve ser mais lenta em relação à de corrente. Desta forma foi definido um tempo para estabilização para o critério de 5% dez vezes mais lento que o tempo de estabilização da malha de

corrente (0,2s) e um fator de amortecimento $\xi = 0,707$, o valor da capacitância é apresentado no apêndice A. A tensão V_{de} é a tensão de pico em uma fase (180V) e a tensão desejada no barramento CC é de 400V.

O PI para a malha de tensão no formato polo-zero é apresentado em (30).

$$G_{V_c}(s) = 0,4579 \left(\frac{s+35}{s} \right) \quad (30)$$

A Figura 26 revela a malha de tensão com os ganhos calculados.

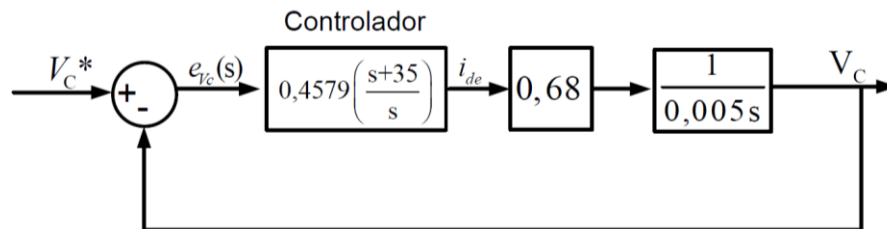


Figura 26 - Malha de Controle de Tensão
Fonte: Autoria Própria

Ao final do capítulo serão apresentados os resultados da dinâmica da malha de tensão.

3.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Este item apresenta os principais resultados obtidos para o conversor do lado da rede. O conversor foi simulado em ambiente *Matlab/Simulink/Simscape/Simpowersystem*. Para os testes com este conversor uma carga resistiva foi conectada ao barramento CC.

A Figura 27 apresenta o conversor do lado da rede em ambiente de simulação, onde são apresentados os principais blocos do sistema. No subsistema "Controle do conversor do lado da rede" está contida a estratégia de controle deste conversor conforme mostra Figura 16.

Para que o conversor do lado da rede possa ter um fluxo de potência do barramento CC para a rede, obrigatoriamente a tensão no barramento deve ser maior que a tensão de pico de linha. O conversor está conectado a uma rede

trifásica 220V – 60Hz, desta a forma a tensão de pico de linha é de 311V, sendo assim, foi definido um valor de tensão no barramento CC de 400V.

Tanto o conversor para o lado da rede, quanto o do lado do gerador, devem ser dimensionados pela potência nominal do gerador (3KW), uma vez que devem processar 100% da energia gerada.

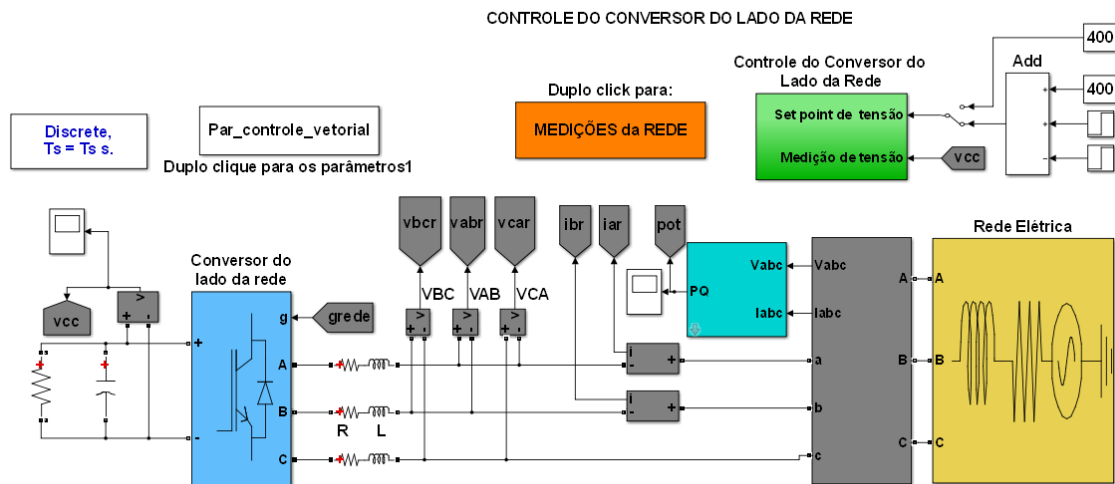


Figura 27 - Conversor do lado da rede implementado em simulação
Fonte: Autoria Própria

A carga resistiva acoplada ao conversor do lado da rede foi dimensionada para a máxima potência de 3kW, sendo seu valor de 53,3Ω.

Inicialmente são apresentados as formas de onda das tensões de linha V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} . Os valores estão apresentados em valores por unidade (pu) sendo a tensão base como a tensão de pico de fase, portanto $1pu = \sqrt{2} \cdot 127 = 179,6 \text{ V}$. A Figura 28 mostra as tensões de linha da rede.

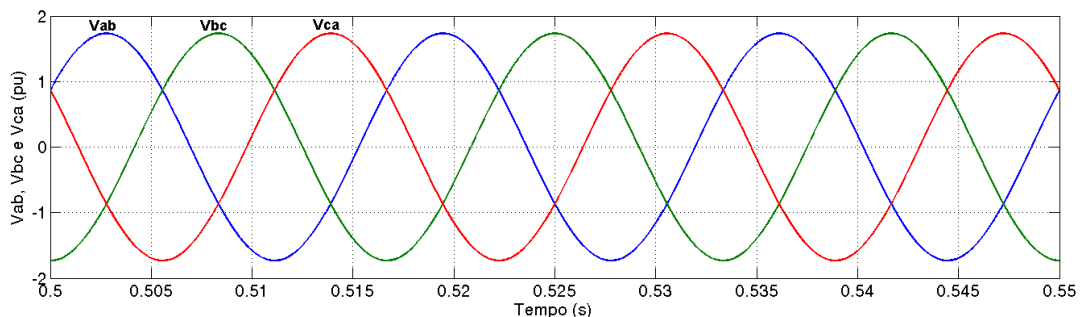


Figura 28 - Tensões de Linha da Rede
Fonte: Autoria Própria

A Figura 29 revela as tensões $V_{\alpha e}$ e $V_{\beta e}$ decorrentes da Transformada de Clark, onde a tensão $V_{\alpha e}$ é orientada com a tensão de fase V_A segundo o diagrama fasorial apresentado na Figura 12.

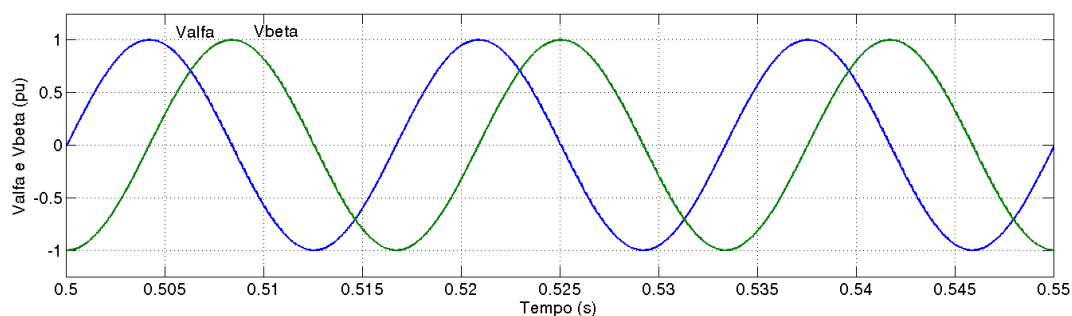


Figura 29 – Tensões $V_{\alpha e}$ e $V_{\beta e}$
Fonte: Autoria Própria

As tensões V_{de} e V_{qe} são apresentadas na Figura 30, provenientes da Transformada de Park, onde V_{de} tem o valor de 1pu e V_{qe} é zero. Estes valores de V_{de} e V_{qe} indicam o correto alinhamento da tensão V_e resultante da rede com o eixo V_{de} .

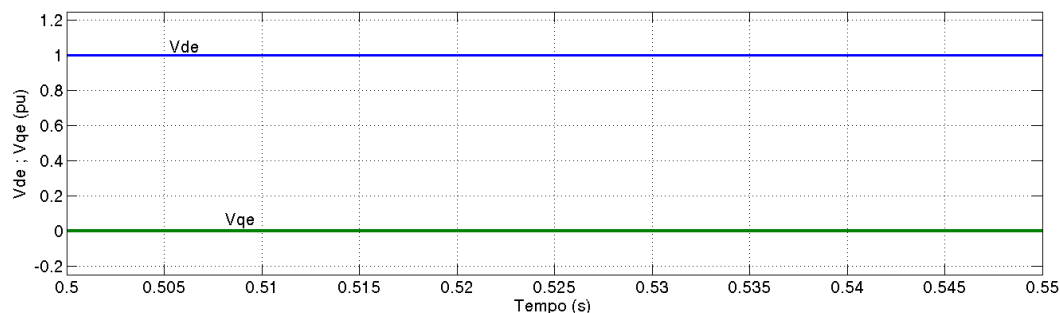


Figura 30 - Tensões V_{de} e V_{qe}
Fonte: Autoria Própria

A posição theta da tensão da rede é apresentada na Figura 31. Os resultados da dinâmica de controle do conversor do lado da rede são apresentados a seguir, onde alguns degraus foram impostos para testar a dinâmica do sistema.

Inicialmente é apresentada a dinâmica da malha de tensão do barramento CC. Um valor de referência de 400V é imposto ao sistema, em 0,75s de simulação é

dado um degrau para 450V e em 1,5s de simulação é realizado um novo degrau para 400V.

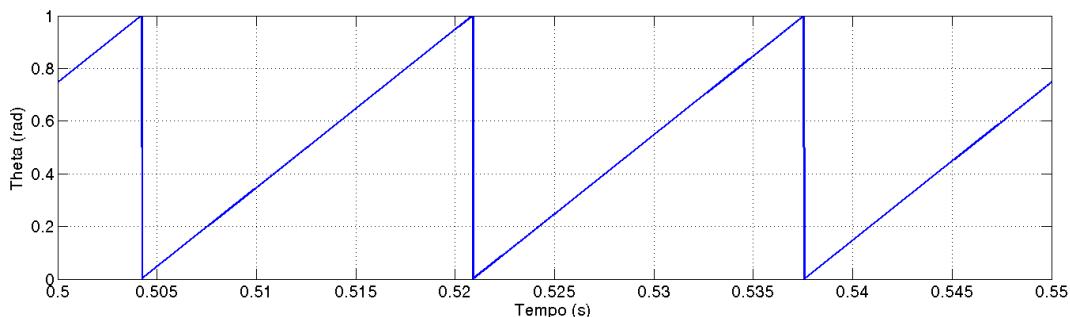


Figura 31 - Posição Theta da Rede
Fonte: Autoria Própria

A Figura 32 apresenta os valores de referência, bem como a dinâmica da malha de tensão, observa-se que para a mudança dos valores de referência, o controle atua levando um tempo aproximadamente de 0,2s de acomodação como projetado.

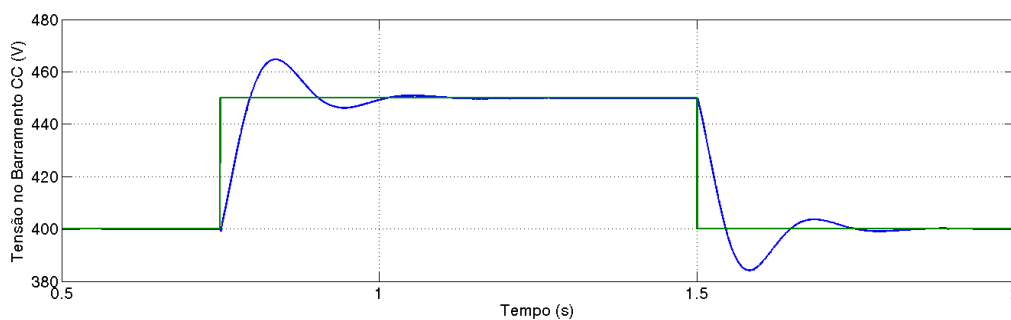


Figura 32 - Dinâmica da Malha de Tensão
Fonte: Autoria Própria

A Figura 33 mostra a dinâmica das correntes i_{de} e i_{qe} quando dados os degraus no barramento CC. A corrente i_{de} é responsável pelo controle da potência ativa do sistema, enquanto a corrente i_{qe} controla a potência reativa. Durante o teste da dinâmica da malha de tensão a referência da corrente i_{qe} foi mantida em zero, ou seja, a potência reativa deve ser nula. A corrente i_{de} segue a referência proveniente da malha externa de tensão.

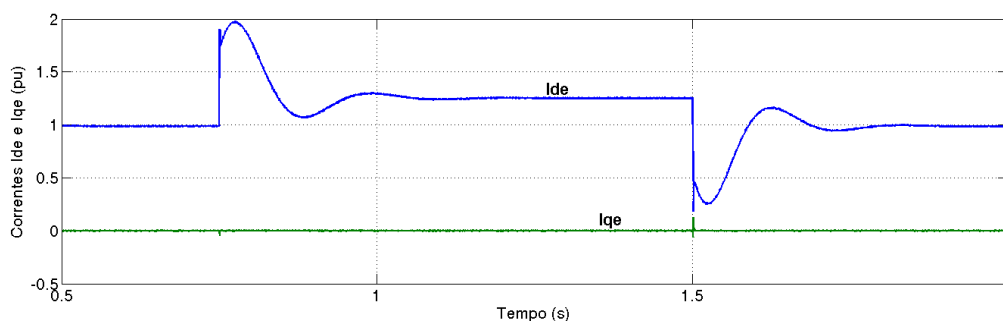


Figura 33 - Correntes i_{de} e i_{qe}
Fonte: Autoria Própria

O último teste realizado para o conversor do lado da rede é a dinâmica da malha da corrente i_{qe} , responsável pelo controle da potência reativa. Para este teste, o barramento CC foi mantido em 400V com uma carga resistiva dimensionada para a potência nominal de 3kW. Inicialmente a referência da corrente i_{qe} é mantida em zero, em 0,75s de simulação um degrau é dado para 1pu, em 1s é realizado um novo degrau de -1pu e finalmente em 1,25s uma nova referência é imposta para zero. A Figura 34 apresenta a dinâmica.

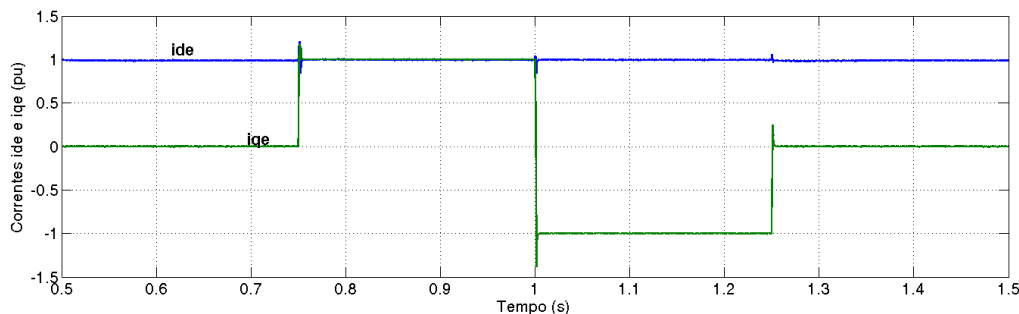


Figura 34 - Correntes i_{de} e i_{qe}
Fonte: Autoria Própria

A potência ativa e reativa pode ser visualizada na Figura 35, observa-se que o último teste realizado onde a tensão no barramento CC é de 400V com carga nominal a potência ativa é 3kW, a potência reativa foi controlada segundo os degraus anteriormente citados. É evidente que quando a referência de i_{qe} é mantida em zero, a potência reativa também é nula. Desta forma a tensão e a corrente vistas pela rede estão em fase.

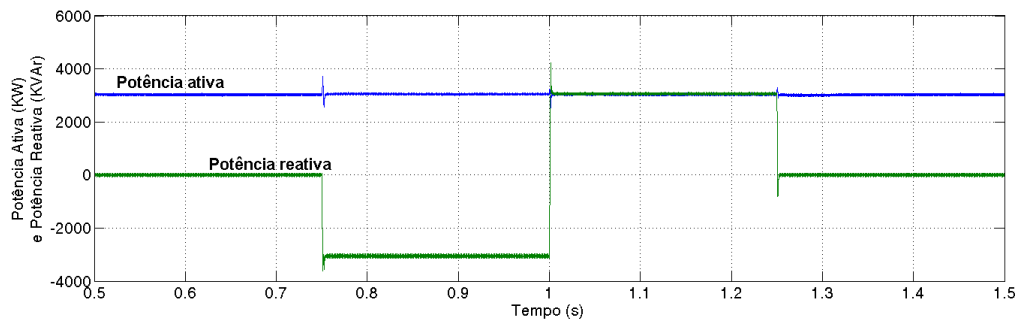


Figura 35 - Potência Ativa (KW) e Potência Reativa (KVAr)
Fonte: Autoria Própria

3.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi discutido o controle para o conversor do lado da rede, responsável por controlar a potência ativa e reativa injetadas na rede. Neste caso, a corrente I_{de} é responsável pelo controle da tensão do barramento CC (potência ativa) enquanto que a corrente I_{qe} controla a potência reativa.

A obtenção da posição e módulo da tensão da rede foi apresentada com a utilização de uma malha de detecção de fase (PLL), responsável pelo sincronismo entre o sistema de controle do conversor em relação à tensão da rede.

Foi apresentado o diagrama de blocos da estratégia de controle, bem como o projeto dos controladores utilizados para as malhas de controle de corrente e de tensão.

Ao final do capítulo os principais resultados obtidos foram apresentados, onde foi possível observar as dinâmicas do conversor. Os objetivos de controle de tensão no barramento e controle sobre as potências foram alcançados com sucesso.

4 SISTEMA DE CONTROLE DO GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA

Os sistemas eólicos possuem uma gama bastante diversificada quanto ao tipo de gerador e controle ao qual são configurados (GUERRERO E BLAABJERG, 2009).

Neste trabalho o gerador a ser utilizado é um gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo (GIGE). A escolha desse gerador deve-se ao fato de sua robustez, simplicidade de construção e ainda reduzida manutenção.

O controle do gerador de indução é bastante discutido por vários autores, como em Azzolin et.al (2002) no qual o controle é realizado pelo escorregamento da máquina. Em Senjyu, Yasutaka e Sekine é realizado o controle sensorless de uma máquina de indução de 2,3KW onde são apresentadas as técnicas utilizadas pelos autores bem como o modelo do observador de estados para estimação de velocidade.

Neste capítulo serão descritas as equações da máquina de indução trifásica em variáveis dq bem como a estratégia de controle do gerador. A estratégia de controle proposta neste trabalho é realizada através do controle vetorial direto orientado pelo fluxo no rotor do gerador de indução, que proporciona algumas melhorias em relação á questão de implementação prática desta forma de controle do gerador de indução.

A implementação prática de um sistema de controle para uma máquina acarreta em alguns problemas, como por exemplo, a medição de tensão nos terminais da máquina, necessária para estimação de fluxo. O conversor eletrônico aplica pulsos de tensão nos terminais do gerador, sendo necessários sensores de tensão para a correta estimação do fluxo. Um dos pontos de melhoria apresentado neste trabalho é a reconstrução das tensões de linha aplicadas ao motor sem a necessidade de sensores, apenas utilizando os pulsos aplicados e o nível de tensão existente no barramento CC. Está técnica é apresentada em Batzel e Comanescu (2007).

A configuração do sistema descrito abaixo é apresentada na Figura 36, na qual será discutido sobre o conversor conectado no lado do gerador.

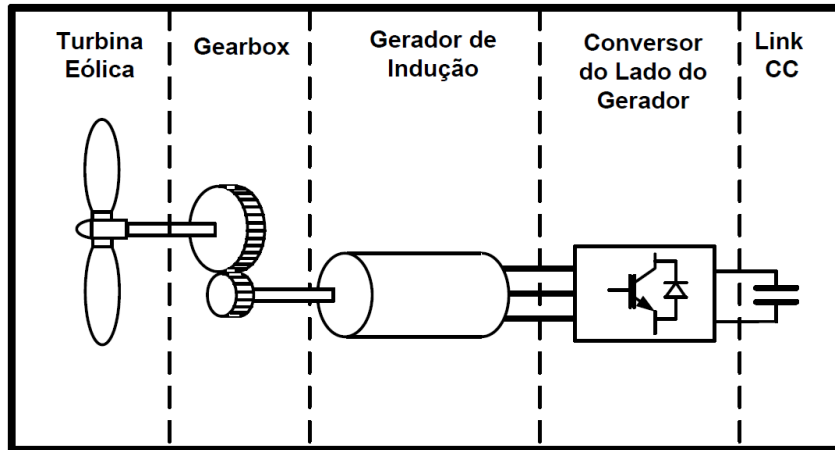


Figura 36 - Sistema Eólico com o Conversor do lado do Gerador
Fonte: Autoria Própria

4.1 MODELO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA EM VARIÁVEIS DQ

Como já mencionado no capítulo anterior, utiliza-se do recurso de transformação de eixos de referência para simplificar o modelo matemático de um sistema.

Desta forma com base nos conceitos já apresentado no item 3.1.1 é possível estabelecer as equações da máquina de indução trifásica com rotor em gaiola em variáveis dq , a fim de simplificar seu modelo e a implementação do seu controle. As equações que regem a dinâmica da máquina de indução foram baseadas em Krause (2002).

As equações de tensão para a máquina de indução são mostradas na sequência. Para o estator têm-se as seguintes equações de tensão:

$$\begin{cases} V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \psi_{ds} \\ V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \psi_{qs} \end{cases} \quad (31)$$

Onde V_{qs} é a tensão aplicada no estator máquina da direção q (V), V_{ds} é a tensão aplicada no estator máquina da direção d (V), R_s é a resistência do estator (Ω), i_{qs} é corrente no estator na direção q (A), i_{ds} é a corrente no estator na direção d (A), ψ_{qs}

é o fluxo no estator na direção q (Wb), ψ_{ds} é o fluxo no estator na direção d (Wb) e ω é a velocidade do campo girante (rad/s).

Para o rotor, as equações de tensão são:

$$\begin{cases} V'_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r)\psi_{dr} \\ V'_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r)\psi_{qr} \end{cases} \quad (32)$$

Onde V'_{qr} é a tensão aplicada no rotor máquina da direção q (V), V'_{dr} é a tensão aplicada no rotor da máquina da direção d (V), R_r é a resistência do rotor (Ω), i_{qr} é corrente no rotor na direção q (A), i_{dr} é a corrente no rotor na direção d (A), ψ_{qr} é o fluxo no rotor na direção q (Wb), ψ_{dr} é o fluxo no rotor na direção d (Wb) e ω é a velocidade do campo girante (rad/s) e ω_r é a velocidade do rotor (rad/s).

O conjunto de equações que definem as relações entre corrente e fluxos são apresentadas em (33).

$$\begin{cases} \Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \Psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \\ \Psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \end{cases} \quad (33)$$

Onde ψ_{qs} é o fluxo no estator na direção q (Wb), L_s é a indutância no estator (H), i_{qs} é corrente no estator na direção q (A), L_m é a indutância magnetizante (H), i_{qr} é a corrente no rotor na direção q , ψ_{ds} é o fluxo no estator na direção d (Wb), i_{ds} é a corrente no estator na direção d , i_{dr} é a corrente no rotor na direção d , ψ_{qr} é o fluxo no rotor na direção q (Wb), L_r é a indutância do rotor (H) e ψ_{dr} é o fluxo no rotor na direção d (Wb).

As indutâncias do rotor e estator são definidas por:

$$\begin{cases} L_s = L_{ls} + L_m \\ L_r = L_{lr} + L_m \end{cases} \quad (34)$$

Onde L_s é a indutância do estator (H), L_{ls} é a indutância de dispersão do estator (H), L_r é a indutância do rotor (H), L_{lr} é a indutância de dispersão no rotor (H) e L_m é a indutância magnetizante (H).

O torque desenvolvido pela máquina de indução trifásica em função das correntes no estator e fluxo no rotor é apresentado em (35).

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}) \quad (35)$$

Onde T_e é o torque eletromagnético (Nm), P é o número de polos da máquina, L_m é a indutância magnetizante (H), L_r é a indutância do rotor (H), ψ_{dr} é o fluxo no rotor na direção d (Wb), i_{qs} é corrente no estator na direção q (A), ψ_{qr} é o fluxo no rotor na direção q (Wb) e i_{ds} é a corrente no estator na direção d .

Toda a filosofia de controle apresentada neste trabalho é baseada no controle vetorial direto, onde as estratégias de controle, bem como o cálculo dos ganhos são apresentadas na sequência.

4.2 CONTROLE VETORIAL DO MOTOR DE INDUÇÃO

O controle vetorial foi desenvolvido no início 1970 pela necessidade de suprir a falta de controle de torque e fluxo de forma independente presente no controle escalar. A filosofia do controle vetorial é baseada no controle de uma máquina de indução de forma semelhante ao controle de uma máquina CC com excitação independente (BOSE,2000).

Existem basicamente dois tipos de controle vetorial, o controle vetorial direto e o controle vetorial indireto, onde a diferença básica entre eles é a forma do cálculo de fluxo no rotor da máquina.

A Figura 37 exemplifica a filosofia do controle vetorial, no qual são necessárias as aquisições das correntes e das tensões nos terminais da máquina para estimação de fluxo no rotor. Uma vez que o fluxo é estimado é possível detectar sua posição quer será a referência para as transformadas de Park.

Uma malha de controle de fluxo é adicionada para precisão de controle de fluxo, onde tal malha gera a referência de corrente i_d^* . O torque da máquina será

proporcional a corrente i_q^* que é gerada através de uma malha de controle externa de velocidade (BOSE, 2000).

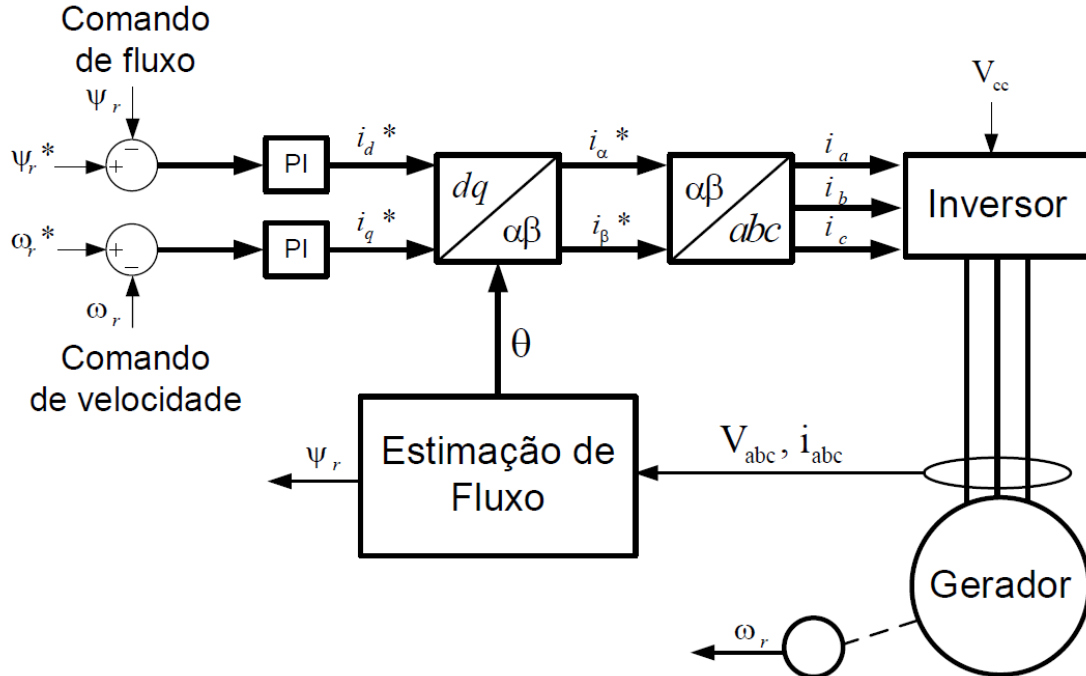


Figura 37 - Filosofia do Controle Vetorial Direto
Fonte: Adaptado de Bose (2000)

4.2.1 Obtenção do fluxo no rotor

A obtenção do fluxo no rotor da máquina para o controle vetorial direto pode ser obtido pelo método da tensão. Para tal método é necessário realizar as aquisições das correntes e tensões nos terminais da máquina, sendo o fluxo calculado no sistema com eixos de referência estacionário ($\omega_e = \alpha, \beta$).

Utilizando tal metodologia as equações de tensão para o estator da máquina (31) podem ser simplificadas a (36).

$$\begin{cases} V_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} \\ V_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} \end{cases} \quad (36)$$

Desta forma pode-se observar que o fluxo no estator da máquina pode ser obtido pela integral das tensões $V_{\alpha\beta}$ subtraídas da queda de tensão da resistência do estator, assim tem-se:

$$\begin{cases} \Psi_{\alpha s} = \int (V_{\alpha s} - R_s i_{\alpha s}) \\ \Psi_{\beta s} = \int (V_{\beta s} - R_s i_{\beta s}) \end{cases} \quad (37)$$

O fluxo no rotor pode ser obtido pela substituição das relações apresentadas em (33) em (38), desta forma o fluxo no rotor pode ser obtido como:

$$\begin{cases} \Psi_{\alpha r} = \frac{L_r}{L_m} (\Psi_{\alpha s} - \sigma L_s i_{\alpha s}) \\ \Psi_{\beta r} = \frac{L_r}{L_m} (\Psi_{\beta s} - \sigma L_s i_{\beta s}) \end{cases} \quad (38)$$

Onde:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s} \quad (39)$$

A estimação do fluxo no rotor da máquina pelo método da tensão acima descrito é apresentada em diagrama de blocos na Figura 38.

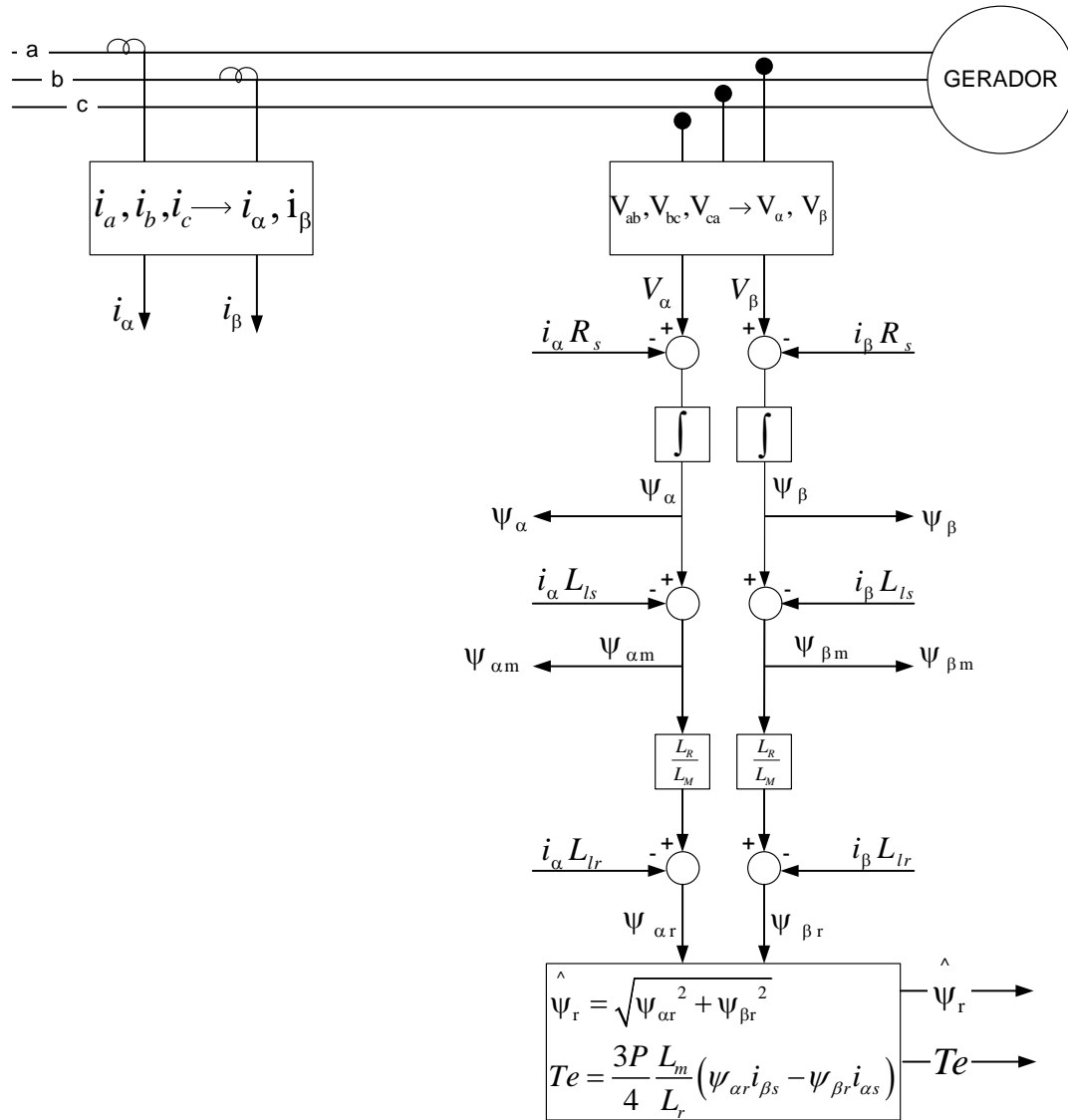


Figura 38 - Estimação de Fluxo no Rotor pelo Método da Tensão
Fonte: Adaptado de Bose (2000)

O método para obtenção do fluxo no rotor é relativamente simples, porém alguns problemas relativos ao aparecimento de um *offset* na integração da tensão podem ocorrer. Em Sena (2011) é apresentado de forma detalhada os problemas que podem causar a ocorrência do *offset*, como a modulação em amplitude e frequência das tensões, correntes no estator e as condições iniciais do sistema no momento de início da integração. Várias soluções são apresentadas a fim de eliminar tal problema para obtenção de fluxo no rotor.

Durante os testes realizados em simulação observou-se o aparecimento do *offset* de fluxo, desta forma um filtro foi adicionado para eliminar o problema. A Figura 39 apresenta o método utilizado para integração. Um filtro passa baixa é

adicionado e sua saída é conectada a uma entrada subtradora para eliminar o *offset*.

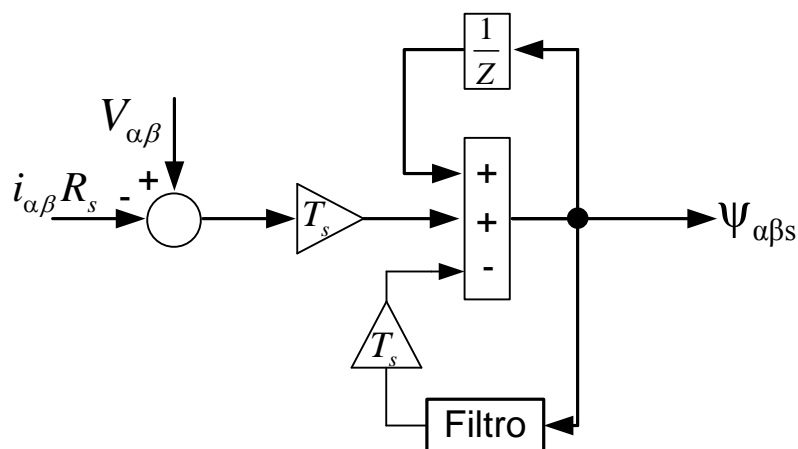


Figura 39 - Integrador com Filtro
Fonte: Autoria Própria

Uma vez que é obtido o fluxo no rotor da máquina, a posição do fluxo é realizada através de um *PLL* de forma análoga ao já realizado para o lado da rede.

O correto alinhamento da corrente i_d na direção do fluxo ψ_r e a corrente i_q perpendicular a ele são pontos fundamentais para o correto funcionamento do controle vetorial.

A Figura 40 auxilia no entendimento do alinhamento do fluxo no rotor. Observa-se que o fluxo resultante dos eixos estacionários (ψ_α e ψ_β) é alinhado com o sistema de eixos de referência girantes dq , tal que o fluxo resultante do rotor esteja alinhado na direção do eixo d , como mostra Figura 40.

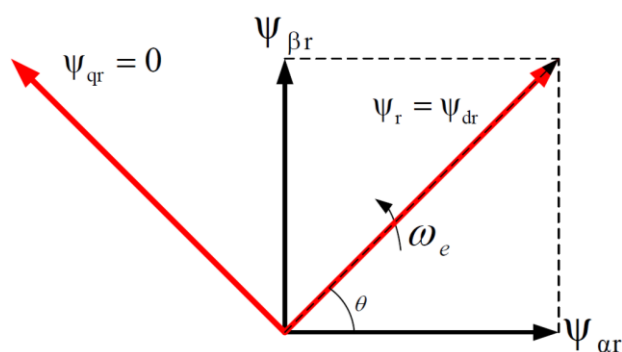


Figura 40 - Orientação do Fluxo no Rotor
Fonte: Autoria Própria

O *PLL* para detecção do fluxo no rotor é apresentado na Figura 41.

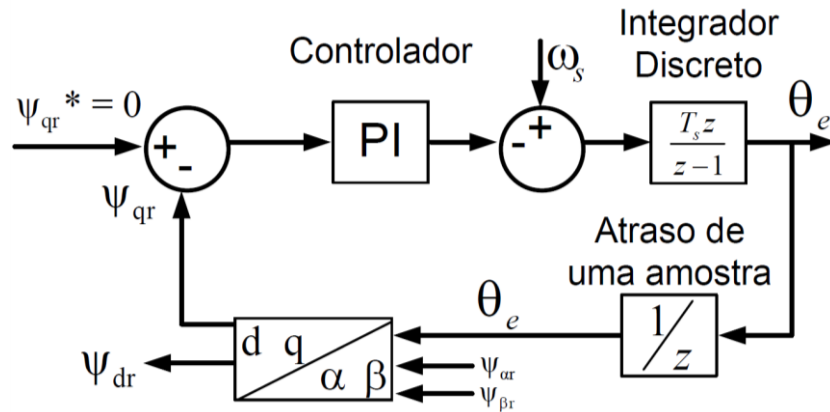


Figura 41 - PLL para orientação da posição do fluxo no rotor
Fonte: Autoria Própria

Através da orientação do fluxo resultante do rotor alinhado com o eixo, pode-se definir que:

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = \Psi_r \\ \Psi_{qr} = 0 \end{cases} \quad (40)$$

Desta forma o torque da máquina pode ser reduzido à equação (41):

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{dr} i_{qs}) \quad (41)$$

É evidente em (41) que o torque eletromagnético na máquina depende da corrente i_{qs} e do fluxo resultante no rotor (Ψ_r), desta forma pode concluir-se que se o fluxo for mantido constante através de uma malha, o torque eletromagnético pode ser controlado através de da corrente i_{qs} .

4.2.2 Sistema de Controle do Conversor do Lado do Gerador

Com base nas equações da máquina em variáveis dq e na correta orientação do fluxo do rotor através do PLL é possível estabelecer as estratégias de controle para o gerador. A Figura 42 apresenta o diagrama de blocos do controle para o lado do gerador de modo detalhado. Nota-se que a malha de controle de velocidade gera a referência para a corrente i_q , enquanto a malha de fluxo gera a

referência para corrente i_d . Uma vez que as correntes são controladas, a saída dos controladores geram as referências de tensão para o inversor.

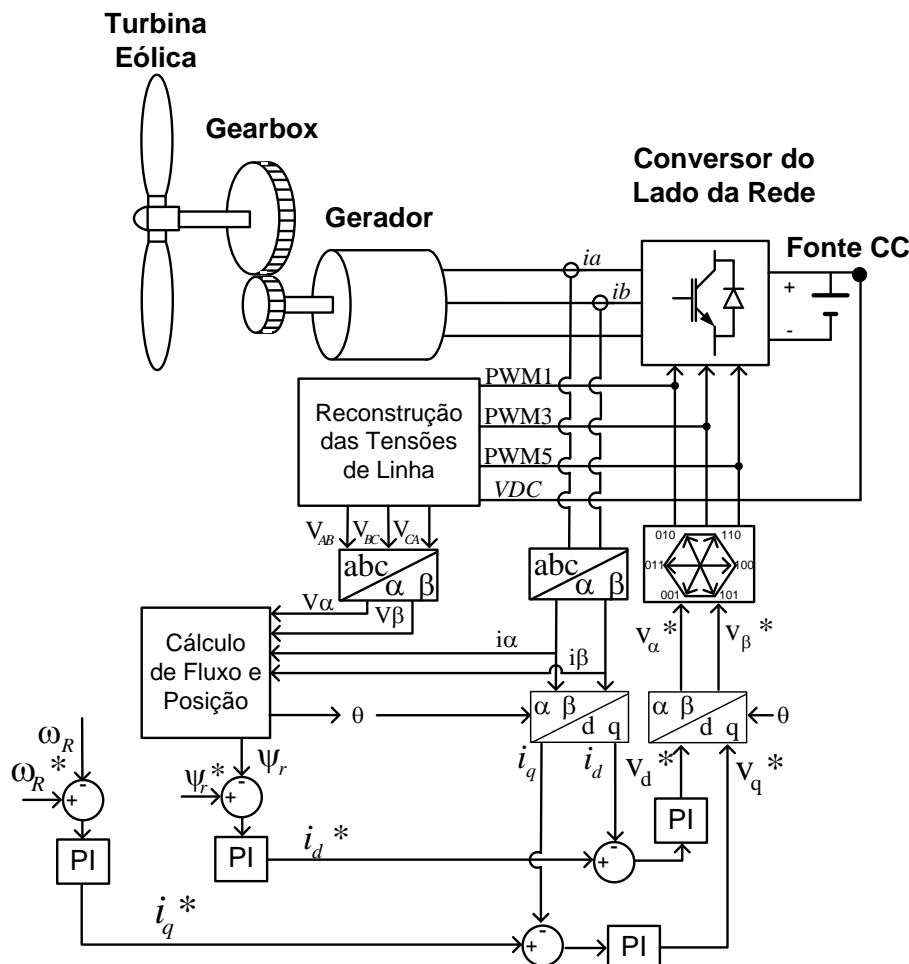


Figura 42 - Diagrama de Blocos para o Gerador
Fonte: Autoria Própria

Ainda na Figura 42 - Diagrama de Blocos para o Gerador é apresentado um ponto de melhoria neste tipo de sistema, que é o modo de aquisição da tensão nos terminais do gerador, onde se dispensa o uso de sensores de tensão. Como o conversor aplica pulsos de tensão, faz-se necessário a presença de um artifício para filtrar a componente em baixa frequência. Em Batzel e Comanescu (2007) é descrito um método de medição através dos pulsos aplicados nos terminais da máquina.

A estratégia utilizada para reconstrução das tensões de linha é baseada na leitura dos pulsos de comando das chaves de potência em conjunto com a leitura da tensão no barramento CC.

Uma vez que o controle das correntes i_d e i_q é realizado corretamente, os pulsos de comando enviados para a comutação do conversor podem ser utilizados

para estimar a tensão que está sendo aplicada nos terminais da máquina, uma vez que é conhecida a tensão presente no barramento cc.

A matriz apresentada em (42) mostra o método para se reconstruir as tensões de linha.

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = V_{cc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \quad (42)$$

A saída obtida para V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} são pulsos que representam as tensões de linha, ainda é necessário um filtro passa baixa, que pode ser construído de maneira digital através de um micro controlador ou processador digital de sinais (PDS). Os valores g_1 , g_2 , g_3 representam os níveis lógicos de comando das chaves superiores de cada braço do inversor de potência.

Desta forma a reconstrução das tensões de linhas através dos pulsos de comando, do barramento CC e um filtro digital podem ser realizados via software, eliminando a necessidade de sensores para a aferição de tensão sendo um ponto de redução de hardware do sistema.

4.2.3 Projeto dos controladores das malhas de corrente

Com base nas equações que descrevem o circuito da máquina em variáveis dq apresentada no item 4.1 é possível realizar a manipulação matemática para obtenção das FTs das correntes i_d e i_q (saídas) pelas tensões que devem ser aplicadas no gerador V_d e V_q (entradas). O projeto do controle será realizado apenas para a corrente i_q , sendo idêntico para a corrente i_d .

Para obtenção da FT de corrente é imprescindível que o fluxo resultante no rotor esteja alinhado com o eixo d .

Através de (33) e (40) é possível estabelecer a seguinte relação:

$$\begin{aligned} \psi_{qr} &= 0 \\ L_r i_{qr} + L_m i_{qs} &= 0 \end{aligned}$$

$$i_{qr} = \frac{-L_m i_{qs}}{L_r} \quad (43)$$

Substituindo (43) na equação de fluxo na direção d obtém-se:

$$\begin{aligned} \Psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \Psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m \frac{-L_m i_{qs}}{L_r} \\ \Psi_{qs} &= L_s i_{qs} - \frac{L_m^2 i_{qs}}{L_r} \end{aligned} \quad (44)$$

Substituindo (44) na equação de tensão para o estator V_{qs} obtém-se (45).

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \left(L_s - \frac{L_m^2 i_{qs}}{L_r} \right) \frac{d}{dt} (i_{qs}) + \omega \Psi_{ds} \quad (45)$$

Isolando a corrente i_{qr} na expressão de fluxo no rotor na direção d , obtém-se (46).

$$i_{dr} = \frac{\Psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_r} \quad (46)$$

Substituindo (46) na equação de fluxo do estator na direção d encontra-se a equação (47).

$$\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m \left(\frac{\Psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_r} \right) \quad (47)$$

Por fim substituindo (47) em (45) obtém-se a expressão (48).

$$V_{qs} = \underbrace{\left[R_s i_{qs} + \left(L_s - \frac{L_m^2 i_{qs}}{L_r} \right) \frac{d}{dt} (i_{qs}) \right]}_{V_{sd}} + \underbrace{\left[\omega \left(L_s i_{ds} + L_m \left(\frac{\Psi_{dr} - L_m i_{ds}}{L_r} \right) \right) \right]}_{V_{sd,comp}} \quad (48)$$

Observa-se na equação (48) que a mesma é dividida em duas sendo a segunda parte considerada apenas como um distúrbio como enunciado por Moham (2001), desta forma a equação (48) pode ser simplificada a equação (49).

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \left(L_s - \frac{L_m^2 i_{qs}}{L_r} \right) \frac{d}{dt} (i_{qs}) \quad (49)$$

Ainda Moham (2001) utiliza a denotação da letra sigma (σ) para simplificação, onde sigma é um fator de dispersão apresentado em (50).

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) \quad (50)$$

Assim a equação (49) pode ser simplificada a equação (51).

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \sigma \frac{d}{dt} (i_{qs}) \quad (51)$$

Aplicando Laplace em (51) e fazendo i_{qs} sobre V_{qs} , finalmente obtém-se a FT apresentada em (52).

$$\frac{i_{ds}}{V_{ds}} = \frac{i_{qs}}{V_{qs}} = \frac{1}{R_s + \sigma L_s s} \quad (52)$$

A Figura 43 mostra a malha da corrente i_{qs} .

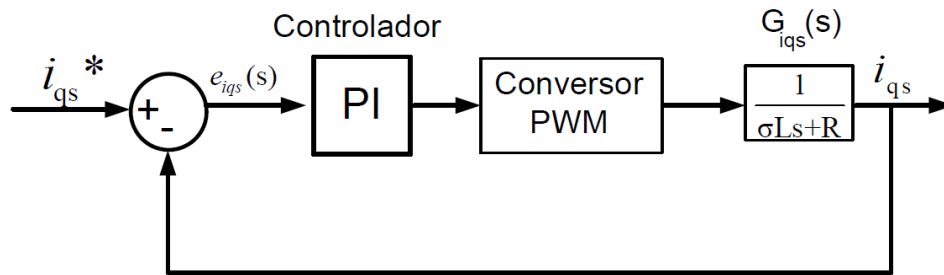


Figura 43 – Diagrama de blocos da malha de controle de corrente i_{qs} do gerador
Fonte: Autoria Própria

O projeto para a malha de corrente foi calculado com base nos itens do apêndice A. A constante de tempo do sistema é de 0,01s, desta forma foi projetado o controlador para um tempo de acomodação 5 vezes mais rápido para o critério de 2% com um fator de amortecimento $\xi = 0,707$.

O PI no formato polo zero é apresentado em (53)

$$G_{i_{qs}}(s) = 2,45 \left(\frac{s + 1889,3}{s} \right) \quad (53)$$

A Figura 44 apresenta o diagrama de blocos para a corrente i_{qs} , onde o mesmo diagrama é válido para a corrente i_{ds} . O ganho do conversor é o mesmo do conversor do lado da rede (230,8).

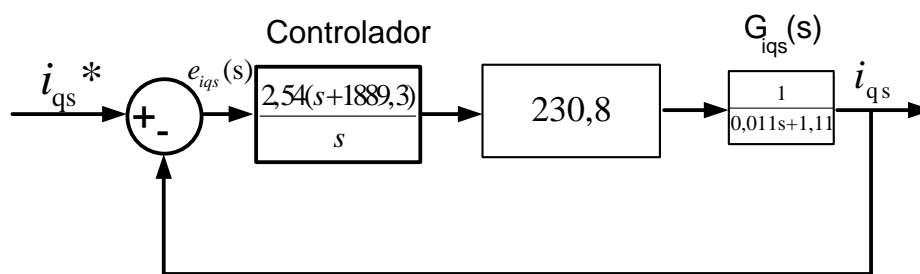


Figura 44 - Malha da corrente i_{qs}
Fonte: Autoria Própria

Ao final do capítulo serão apresentados os resultados de simulação referentes às dinâmicas da malha de corrente.

4.2.4 Método de estimação de velocidade

O método de estimação de velocidade é baseado em Trzynadlowski (1994), onde a estimação de velocidade é derivada das equações apresentadas no item 4.1, sendo relativamente simples, porém é muito importante que os parâmetros da máquina sejam conhecidos com o menor erro possível para que não ocorram erros de estimação. A equação obtida para estimação de velocidade é apresentada na equação (54), para tal estimação não foram considerados os efeitos da variação da resistência no rotor em função da temperatura.

$$\omega_r = \omega_e - \frac{1}{(\Psi_r)} \frac{L_m}{\tau_r} (\Psi_{\alpha r} i_{\beta s} - \Psi_{\beta r} i_{\alpha s}) \quad (54)$$

Onde:

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (55)$$

4.2.5 Projeto da malha de velocidade

A malha de controle de velocidade é baseada em Mohan (2001) e Bose (2000), onde através da equação (41) é possível obter a FT para tal malha. Considerando que, o fluxo resultante do rotor é constante, ou seja, a malha de fluxo está funcionando adequadamente, a equação (41) pode ser apresentada como em (56), onde K_t representa a constante de torque. A malha para controle de fluxo será apresentada no próximo item.

$$T_e = K_t i_{qs} \quad (56)$$

Onde K_t é apresentado em (57).

$$K_t = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \quad (57)$$

Com base nas equações acima a malha de velocidade é apresentada na Figura 45, onde J_s é a inércia do rotor e B é o atrito.

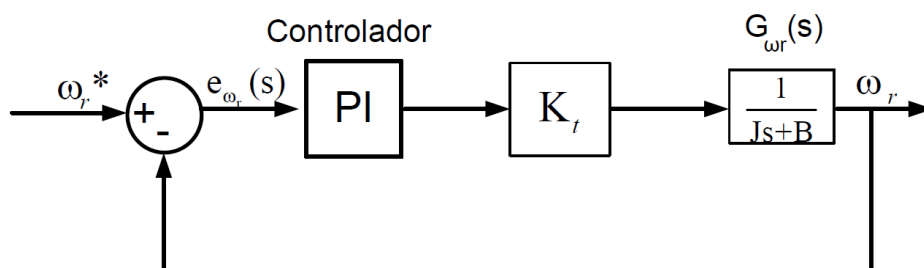


Figura 45 - Malha de Controle de Velocidade
Fonte: Autoria Própria

O projeto do controle foi realizado considerando um tempo de estabilização para o critério de 2% 5 vezes mais lento que a constante elétrica da malha de corrente (0,25s). O PI para a malha de velocidade é apresentado em (58) e é baseado nos parâmetros do apêndice A.

$$G_{\omega_r}(s) = 40 \left(\frac{s+626.4}{s} \right) \quad (58)$$

A Figura 46 mostra o diagrama final para a malha de velocidade.

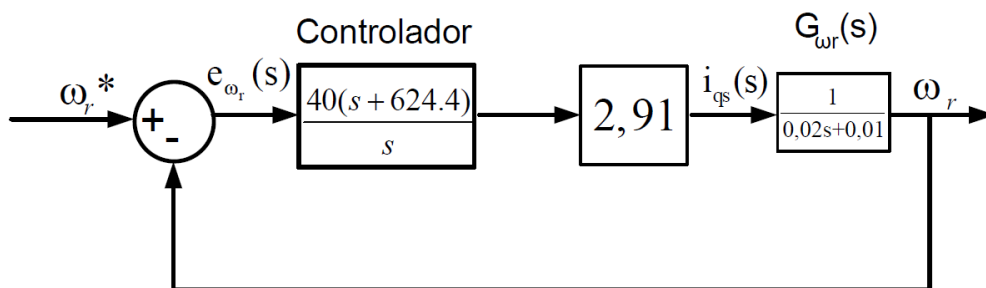


Figura 46 - Malha de Velocidade
Fonte: Autoria Própria

Ao final do capítulo serão apresentados os resultados da dinâmica da malha de velocidade.

4.2.6 Projeto da malha de fluxo

A malha de fluxo tem por finalidade manter constante o fluxo no rotor, sua malha é baseada em Mohan (2000). A equação (59) apresentada pelo autor mostra a relação entre as correntes i_{rd} e i_{ds} .

$$i_{dr}(s) = -\frac{sL_m}{R_r + sL_r} i_{ds}(s) \quad (59)$$

Substituindo a equação (59) na equação (33) pra o fluxo do rotor na direção d, obtém-se (60).

$$\frac{\Psi_{rd}(s)}{i_{ds}(s)} = \frac{L_m}{(1 + s\sigma_r)} \quad (60)$$

Onde σ_r é apresentado em (61).

$$\sigma_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (61)$$

A Figura 47 apresenta a malha de fluxo.

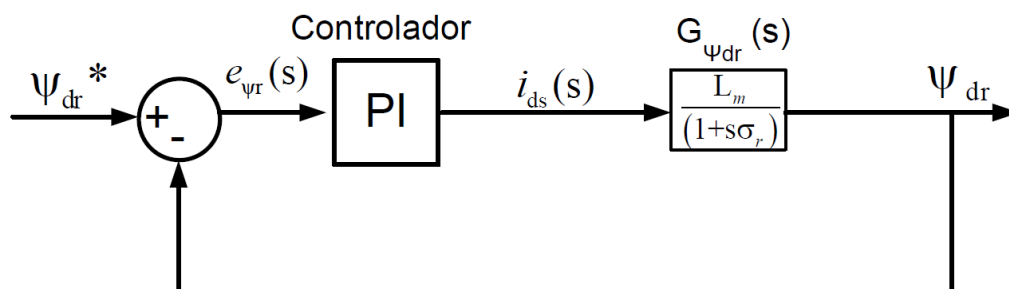


Figura 47 - Malha de Fluxo
Fonte: Autoria Própria

O projeto do controle da malha de fluxo foi realizado para um tempo de acomodação igual ao da malha de velocidade para o critério de 2% (0,25s) e um fator de amortecimento $\xi = 0,707$. O PI para a malha de fluxo é apresentado em (62).

$$G_{i_{qs}}(s) = 1,2 \left(\frac{s+2928,8}{s} \right) \quad (62)$$

A Figura 48 mostra a malha de fluxo com os valores calculados.

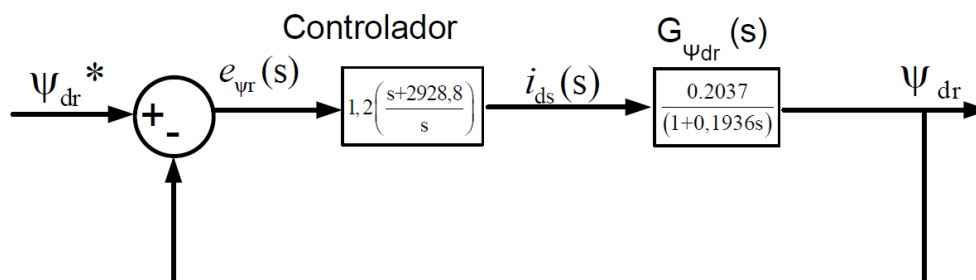


Figura 48 - Malha de Fluxo
Fonte: Autoria Própria

Ao final do capítulo serão apresentadas as dinâmicas da malha de fluxo.

4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Assim como realizado para o conversor do lado da rede, o conversor do lado do gerador foi testado separadamente, onde uma fonte CC de 400V foi conectada na entrada do inversor. A Figura 49 apresenta o conversor para o lado do gerador. A caixa em verde apresenta a estratégia da Figura 42. Para este teste foi realizado um torque proporcional a velocidade na operação como gerador (-15/188.5).

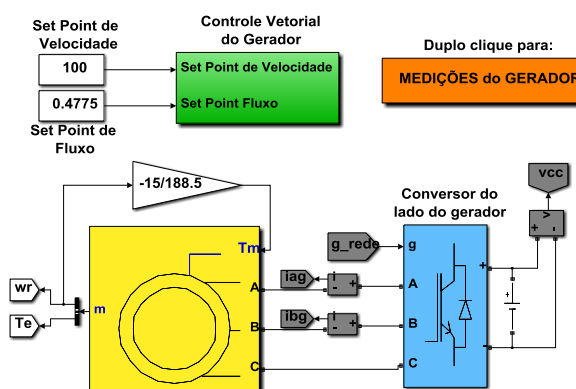


Figura 49 - Controle do Gerador Implementado em Simulação
Fonte: Autoria Própria

O primeiro teste realizado para o conversor é a aquisição das tensões de linha através do método da reconstrução pelos pulsos de comando e da tensão

disponível no barramento CC. Para este teste foi imposta uma velocidade de 188,5 rad/s com uma carga de -15Nm. A fonte contínua conectada na entrada do conversor é de 400V, o mesmo valor utilizado para o conversor para o lado da rede.

A Figura 50 apresenta as tensões de linha reconstruídas pelo apresentado no item 4.2.2, onde os valores são mostrados em pu ($1pu = \sqrt{2} \cdot 127V = 179,6V$).

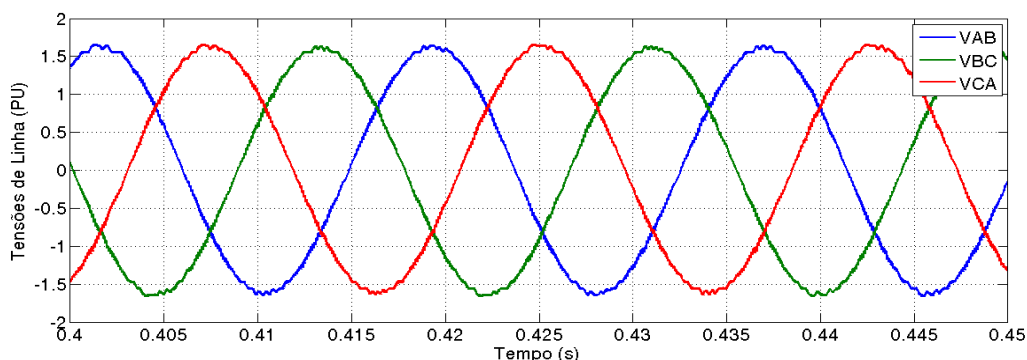


Figura 50 - Tensões de Linha Reconstruídas
Fonte: Autoria Própria

As correntes nas fases no gerador são apresentadas na Figura 51, onde os valores são apresentados em pu, onde um pu de corrente é obtido pela razão da potência base (3kW) e tensão base (1pu = 11,55A).

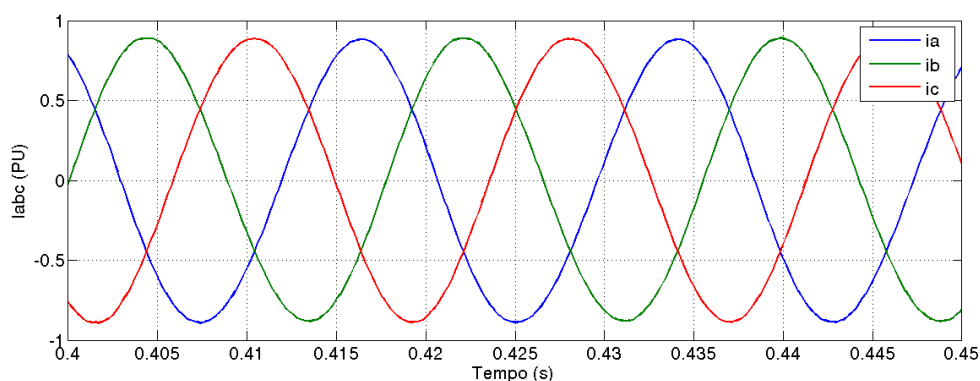


Figura 51 - Correntes iabc
Fonte: Autoria Própria

A seguir são apresentados os fluxos $\psi_{\alpha r}$ e $\psi_{\beta r}$ estimados no rotor da máquina de indução.

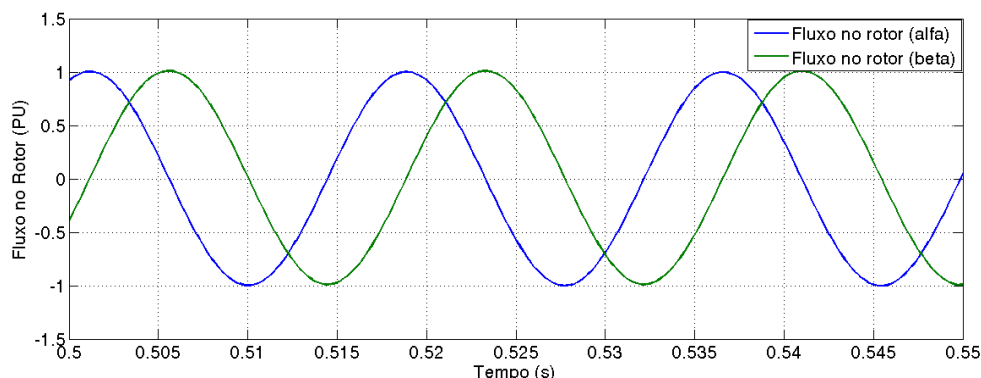


Figura 52 - Fluxos alfa e beta no rotor
Fonte: Autoria Própria

O resultado é apresentado em valores por unidade, onde o fluxo base é obtido entre a relação da tensão base (179,6) e a frequência base (377rad/s), desta forma o fluxo base é 0,4775Wb (1 pu = 0,4775). O resultado apresenta o fluxo no rotor já com a malha de controle onde foi imposto o valor de 1pu. Posteriormente será apresentada a dinâmica desta malha.

Através do PLL é possível realizar a orientação do fluxo resultante entre alfa e beta na direção do eixo d, conseqüentemente o fluxo q é nulo. Ainda se pode calcular a posição do fluxo no rotor. A Figura 53 apresenta a posição theta do fluxo resultante.

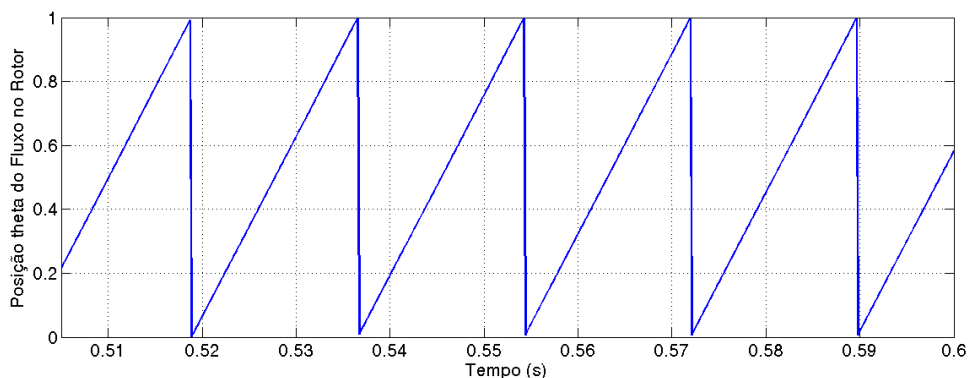


Figura 53 - Posição Theta do Fluxo no Rotor
Fonte: Autoria Própria

A Figura 54 apresenta os fluxos d e q, onde se observa claramente que o fluxo resultante no rotor foi alinhado na direção d, enquanto em q o mesmo é nulo.

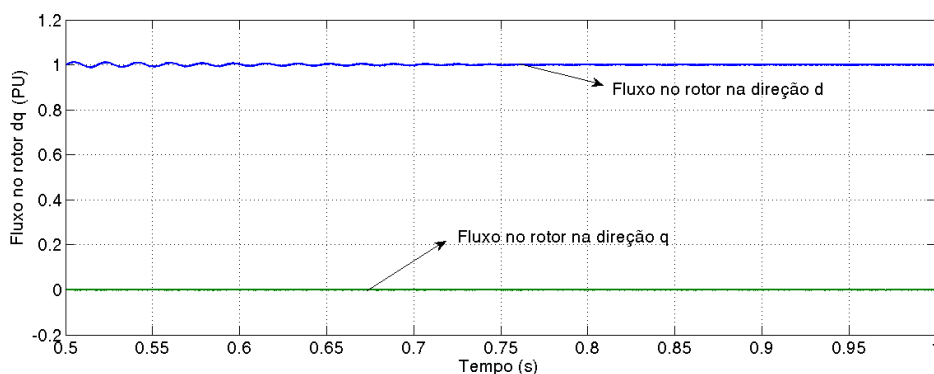


Figura 54 - Fluxo dq no rotor
Fonte: Autoria Própria

O próximo teste realizado é para as malhas de corrente i_d e i_q . Para este teste foi imposta uma velocidade de 100 rad/s para o gerador e um fluxo nominal de 1pu para uma carga de -7.5 Nm. Como apresentado no diagrama do esquema de controle da Figura 42, as referências das correntes i_d e i_q provém das malhas de fluxo e velocidade respectivamente.

A Figura 55 revela as correntes i_d^* e i_q^* de referência e as correntes i_d e i_q medidas. Observa-se claramente que a estratégia de controle é eficiente. A corrente i_q é responsável pelo controle do torque eletromagnético da máquina, enquanto a corrente i_d controla o fluxo. As dinâmicas corresponderam aos valores projetados.

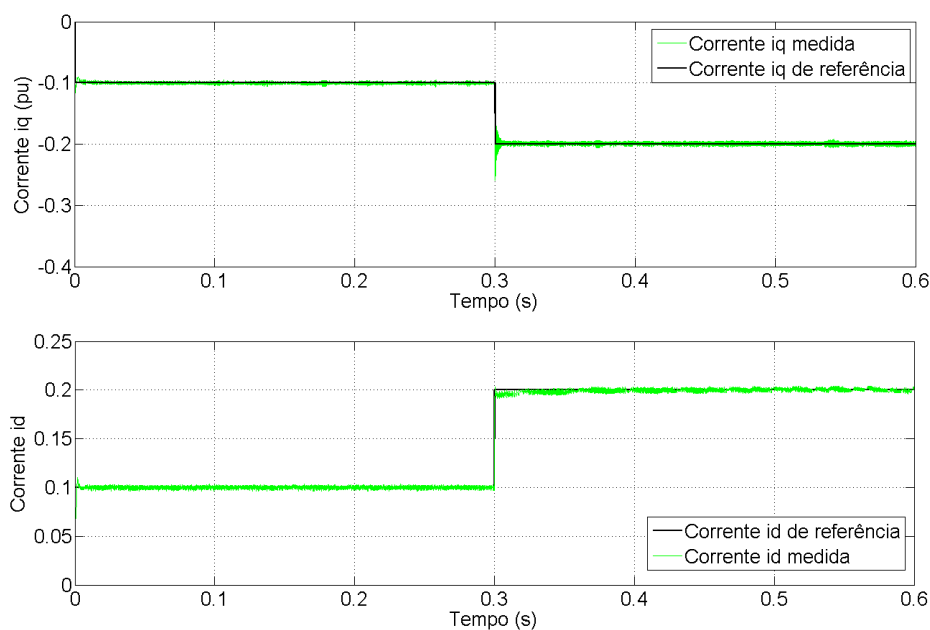


Figura 55 - Corrente i_d e i_q
Fonte: Autoria Própria

O torque e o fluxo para as condições impostas neste teste são apresentadas na Figura 56.

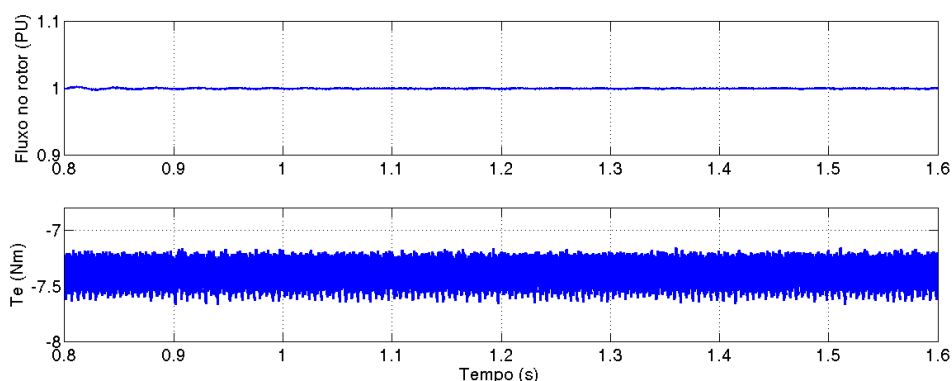


Figura 56 - Fluxo no rotor e Torque Eletromagnético
Fonte: Autoria Própria

Os últimos dois testes realizados foram para comprovar a eficiência da dinâmica da malha de velocidade e da malha de fluxo.

Para o teste da malha de velocidade é colocada uma referência inicial de 100 rad/s e, em seguida é aplicado um degrau para 188,5 rad/s, finalmente, uma referência de 150 rad/s em 1s é imposta. A Figura 57 mostra o comportamento da dinâmica da malha de velocidade.

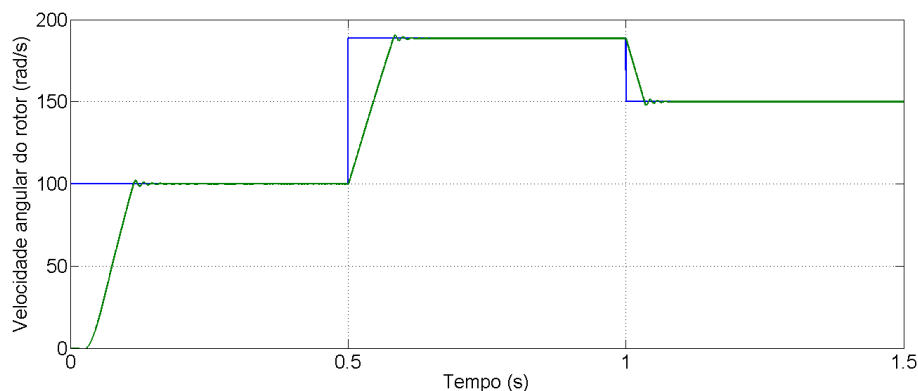


Figura 57 - Velocidade Angular do Gerador
Fonte: Autoria Própria

Para o teste da malha de fluxo inicialmente a referência é de 1 pu, em 1s é elevada a referência para 1,2pu e em 1,5s a referência é imposta para 0,8 pu. A Figura 58 mostra a dinâmica da malha de fluxo. Nota-se que os critérios calculados foram atendidos.

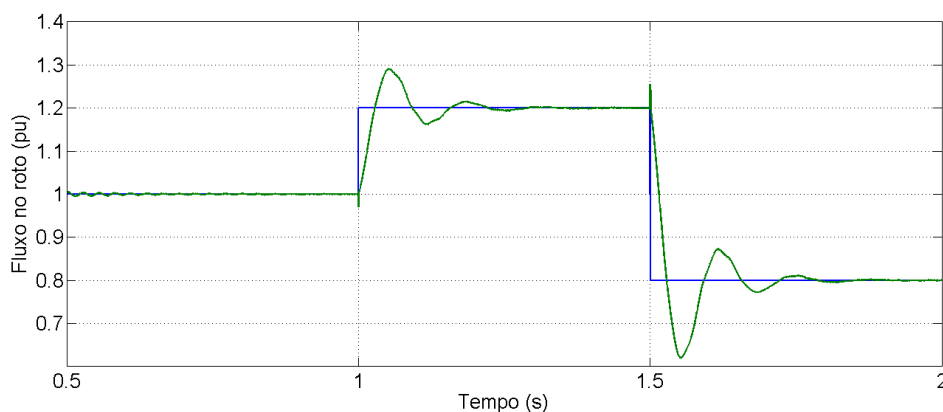


Figura 58 - Fluxo no Rotor
Fonte: Autoria Própria

4.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordadas as equações dq da máquina, bem como as estratégias de controle do gerador de indução com rotor em gaiola. Foi demonstrado o cálculo das FTs para as correntes, velocidade e fluxo. Na sequência, apresentou-se os ganhos dos controladores PI para todas as malhas. Ao final foram apresentados os principais resultados para o conversor do lado do gerador. Os testes foram realizados impondo referência de velocidade e torque negativo para demonstração da operação em modo gerador.

Conclui-se que através da obtenção das FTs e o projeto dos controladores que a dinâmica das malhas foi satisfatória, onde todas as variáveis foram controladas como desejado.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados de todo o sistema, no qual o conversor *back-to-back* realizará o rastreamento de máxima potência (MPPT) proveniente da turbina eólica.

5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

No Capítulo 2 foi realizada a modelagem e simulação da turbina eólica que forneceu as curvas de potência da mesma. Nos capítulos 3 e 4 foram abordadas as estratégias de controle para os conversores da rede e do gerador respectivamente. Este capítulo apresenta os resultados de simulação de todo o sistema, onde a turbina eólica impõe um torque ao eixo do gerador e uma referência de velocidade para o conversor do gerador. Estas informações são empregadas para realizar a extração de máxima potência (MPPT).

Inicialmente é apresentado na Figura 59 o diagrama de blocos de um sistema completo, no qual as estratégias de controle dos conversores da rede e do gerador são detalhadas.

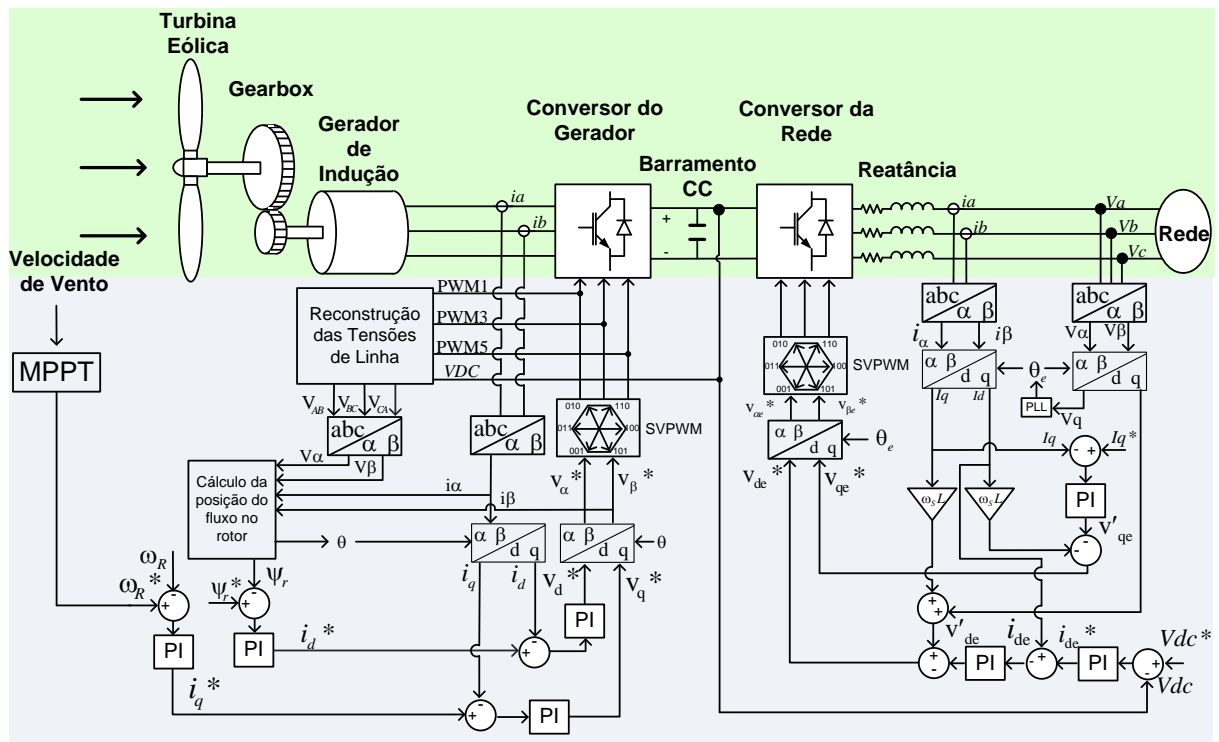


Figura 59 - Esquema Geral do Controle Vetorial do Sistema Eólico
Fonte: Autoria Própria

Nesse sistema a turbina é acoplada ao gerador onde através da velocidade do vento é possível realizar o rastreamento do ponto de ótima potência (MPPT) que fornecerá ao sistema do controle do gerador a velocidade de referência.

A Figura 60 - Sistema Simulado em Ambiente Matlab/Simulink apresenta a estrutura simulada em ambiente Matlab/Simulink, na qual considera ambos os conversores e também a turbina eólica.

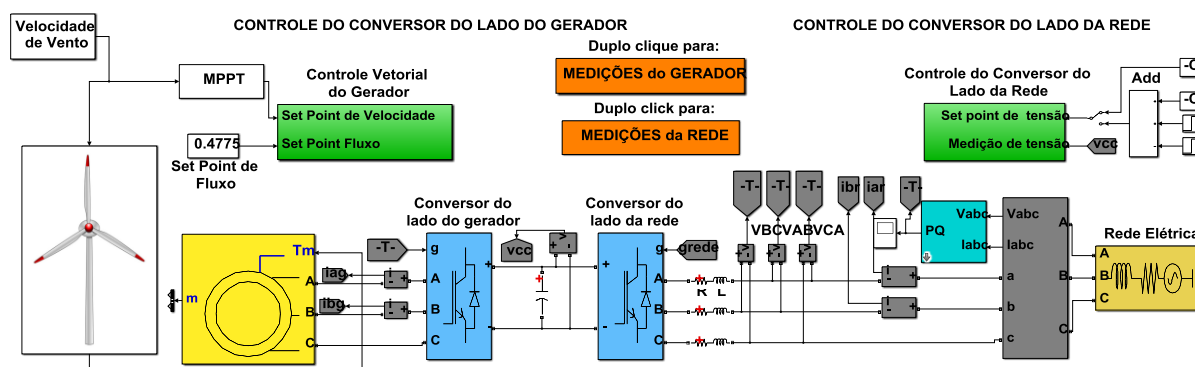


Figura 60 - Sistema Simulado em Ambiente Matlab/Simulink
Fonte: Autoria Própria

Os componentes da simulação foram explanados detalhadamente nos capítulos anteriores, desta forma os próximos resultados compõem o sistema operando como um todo.

Para a realização dos testes foi imposto um perfil de vento para a turbina eólica, sendo inicialmente imposta uma velocidade de vento de 8m/s. Aos 10 segundos de simulação foi realizado um degrau para 12m/s e por fim aos 16 segundos de simulação um novo degrau para 10m/s foi imposto. A Figura 61 - Perfil de Velocidade de Vento revela o perfil de vento imposto para a turbina.

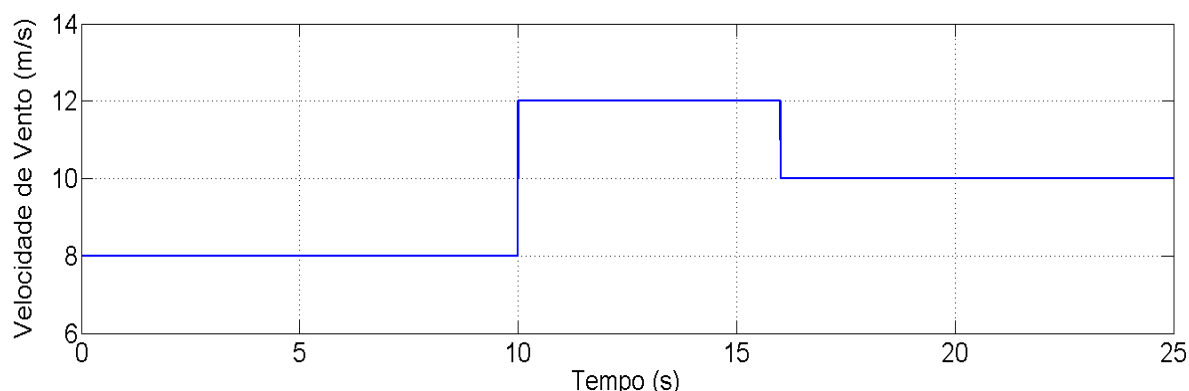


Figura 61 - Perfil de Velocidade de Vento
Fonte: Autoria Própria

Através das diferentes velocidades de vento é possível traçar a velocidade ótima de operação do gerador para que ocorra a máxima de extração de potência de acordo com a equação (3).

Na prática não ocorrem variações de perfil de vento em degrau, desta forma um filtro de primeira ordem foi adicionado à referência de velocidade do gerador, para que quando ocorrer um degrau de vento, a referência de velocidade do gerador se comporte como um sistema de primeira ordem. A Figura 62 demonstra as velocidades de operação ótimas para o perfil de vento da Figura 61 - Perfil de Velocidade de Vento

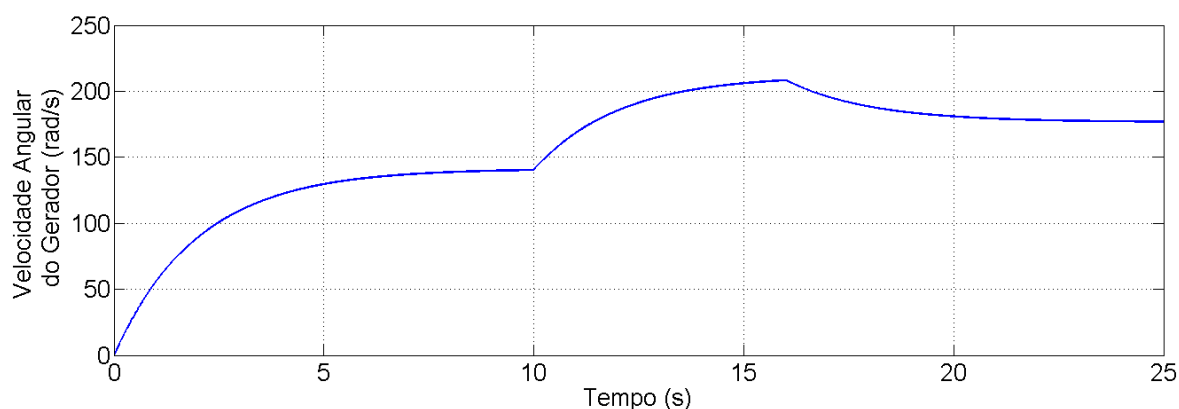


Figura 62 - Referência de Velocidade para o Gerador Eólico
Fonte: Autoria Própria

A Figura 63 demonstra o comportamento da tensão do barramento CC para os degraus de vento impostos ao sistema. Observa-se claramente que para a toda a faixa de teste realizado a tensão se manteve constante, o que comprova a eficiência do comportamento do conversor do lado da rede.

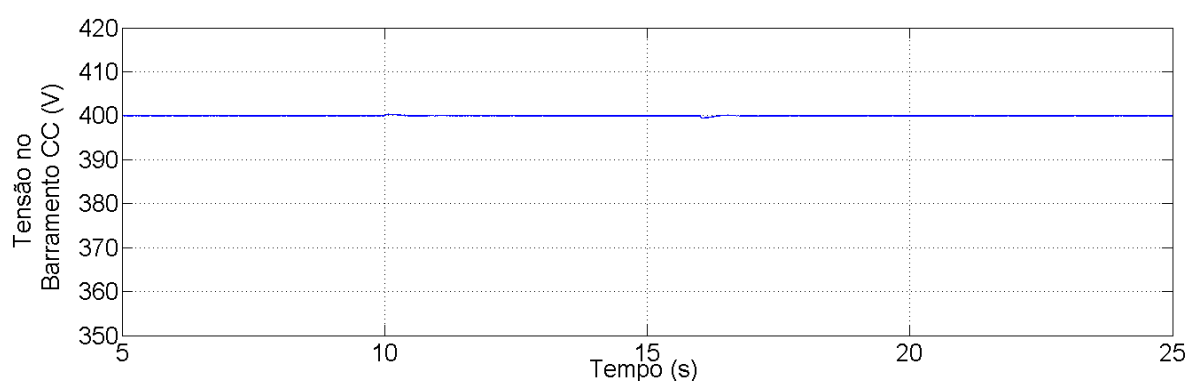


Figura 63 - Tensão no Barramento CC
Fonte: Autoria Própria

A Figura 64 e a Figura 65 apresentam as tensões de fase (V_{abcn}) e as correntes i_{abc} respectivamente. De acordo com Figura 65, as correntes da rede variam com a injeção de potência na mesma.

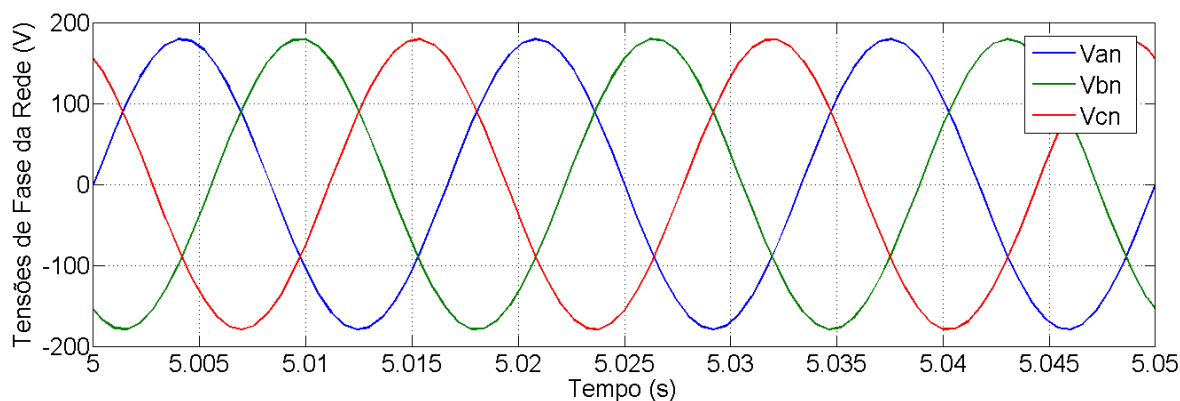


Figura 64 - Tensões de Fase da rede
Fonte: Autoria Própria

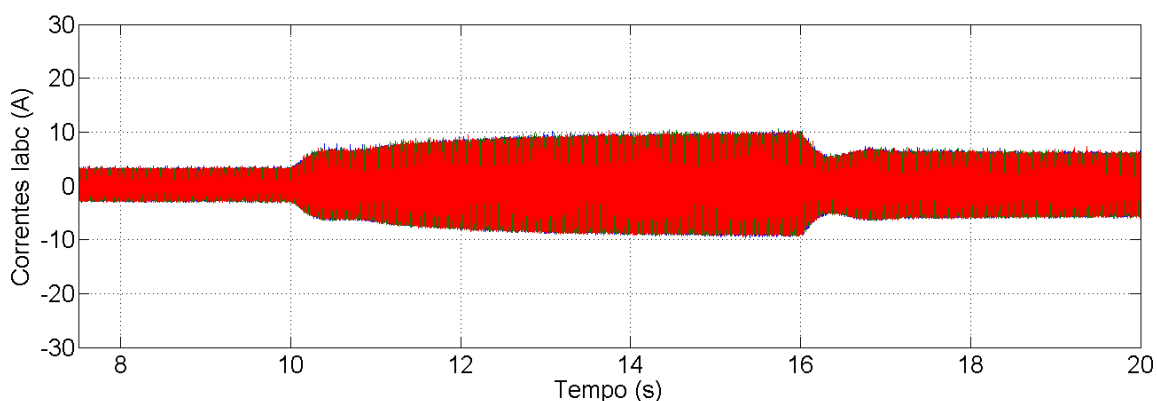


Figura 65 - Correntes i_{abc} injetadas na rede
Fonte: Autoria Própria

A Figura 66 mostra a potência ativa e reativa injetadas na rede. A potência reativa é definida como zero pela referência da corrente i_q imposta ao conversor do lado da rede em toda a operação de faixa de velocidade. A potência ativa varia com a velocidade do vento.

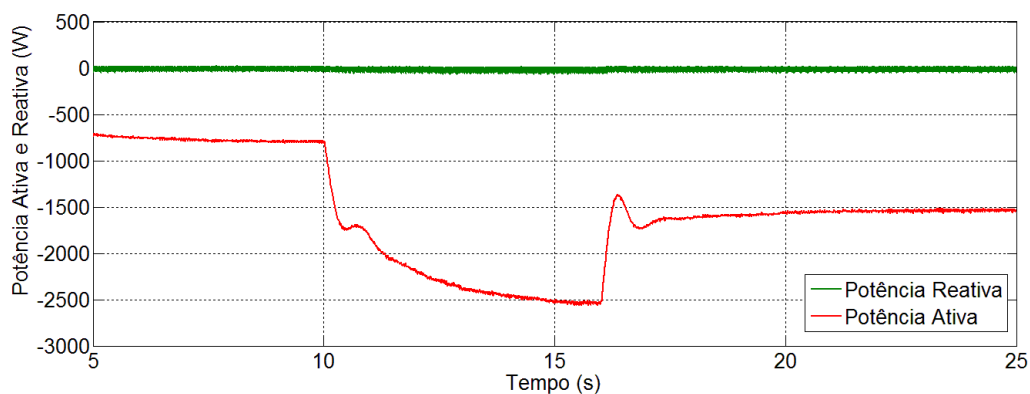


Figura 66 - Potência Ativa e Reativa injetadas na Rede
Fonte: Autoria Própria

5.1 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados os resultados de simulação do sistema como um todo. Ambos os conversores trabalham juntos cada um com sua finalidade. Foi possível observar que para as variações de velocidade de ventos impostas o sistema buscou a máxima extração de potência, onde aos 12m/s ocorre à operação nominal.

O controle para o lado do gerador correspondeu ao seu objetivo de manter a velocidade e torque constante para as diferentes velocidades impostas. O controle do lado da rede também se mostrou satisfatório, onde em toda a faixa de operação a tensão no barramento CC se manteve constante, e a injeção de potência ativa e reativa na rede foram controladas.

6 IMPLMETANÇÃO PRÁTICA DO SISTEMA

Para a realização de testes do controle do gerador de indução, foi construída uma bancada no Centro de Pesquisas Eletrônicas da UTFPR – Ponta Grossa. Este sistema se constitui de um motor de corrente contínua acoplado ao gerador de indução.

A Figura 67 mostra o gerador de indução acoplado a uma máquina de corrente contínua. A máquina de corrente contínua tem como função emular o comportamento de uma turbina eólica.



Figura 67 - Gerador de Indução acoplado a uma Máquina CC
Fonte: Autoria Própria

O sistema de controle para o gerador é mostrado na Figura 68, onde cada circuito será detalhado a seguir.

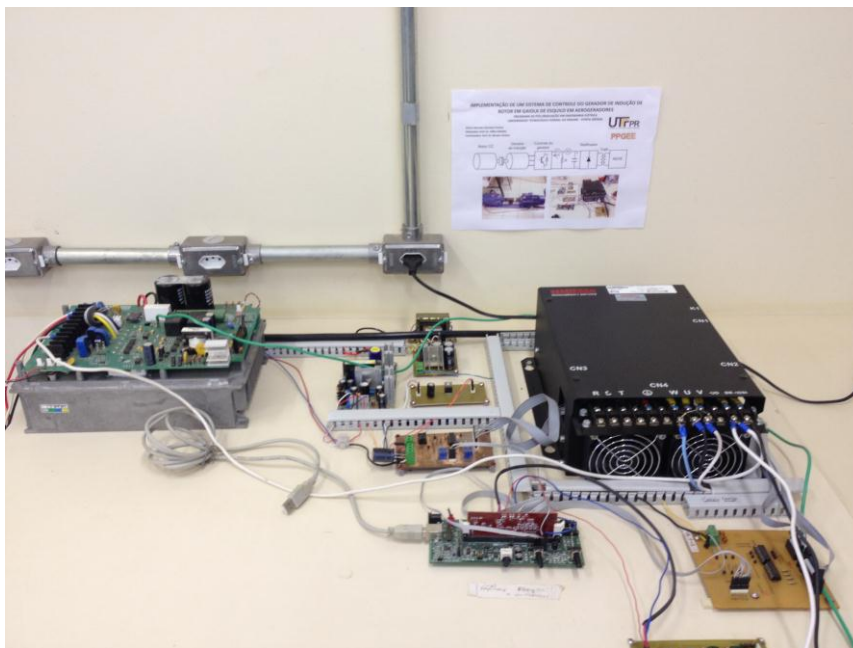


Figura 68 - Sistema de Controle do Gerador de Indução
Fonte: Autoria Própria

6.1 INVERSOR UTILIZADO NO PROTÓTIPO

Para o acionamento da máquina de indução foi utilizado um módulo da SEMIKRON SKS11F trifásico capaz de suportar até 600V no Barramento CC e um uma corrente eficaz de 18A. O diagrama elétrico do módulo é apresentado na Figura 69.

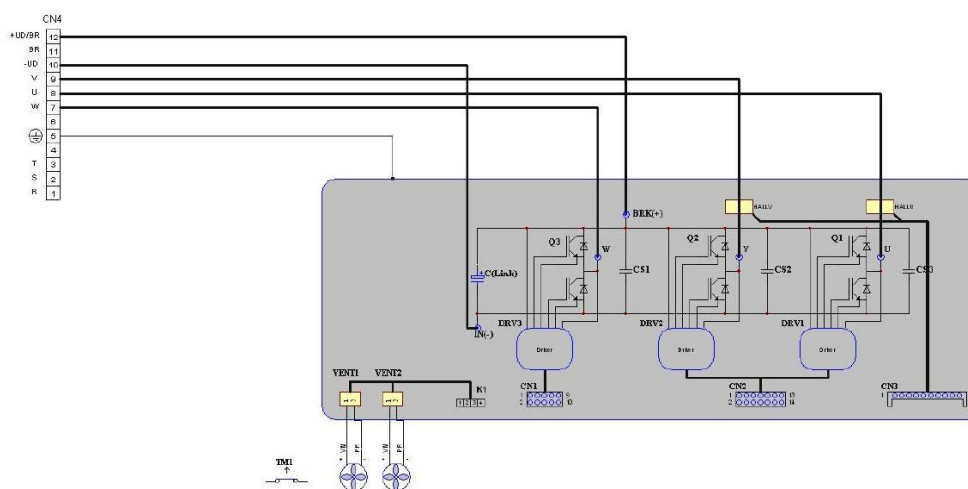


Figura 69 - Diagrama Elétrico do módulo utilizado no protótipo
Fonte: Manual Semikron

Este módulo possui 5 conectores disponíveis. Os conectores CN1 e CN2 são as entradas para os sinais de comando das seis chaves eletrônicas (IGBT's). O

conector CN3 é utilizado para a medição de corrente, visto que dentro do próprio módulo já existem sensores de corrente de efeito Hall nas fases A e B. No conector CN4 são realizadas as ligações do barramento CC e, ainda, as 3 fases para o gerador. Também existe o conector K1 que deve ser alimentado com 24V para o acionamento dos ventiladores para refrigeração do módulo.

A Figura 70 mostra o módulo utilizado para o acionamento do motor bem como os conectores disponíveis.

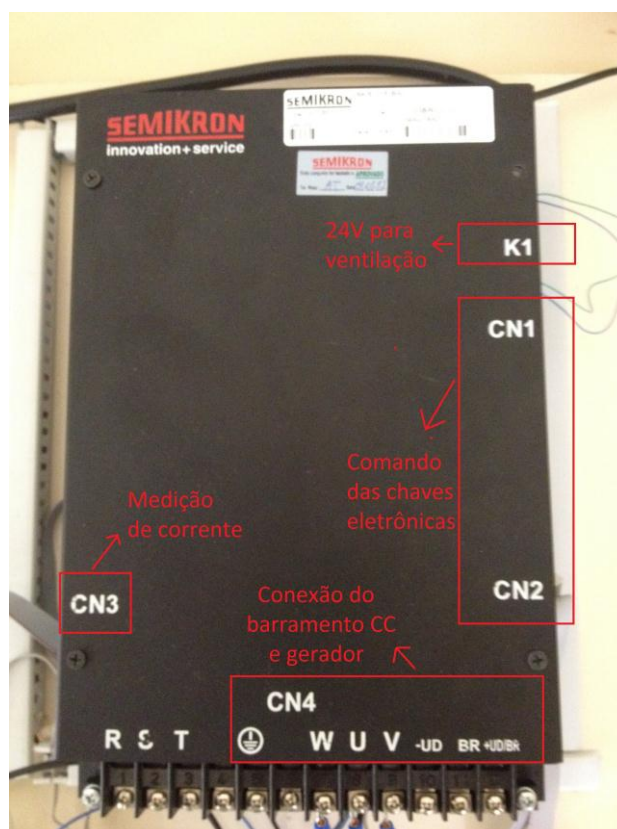


Figura 70 - Módulo utilizado no Protótipo
Fonte: Autoria Própria

6.2 PROCESSADOR DIGITAL DE SINAIS

O controle do sistema foi realizado através de uma placa de desenvolvimento (Peripheral Board) da marca Texas Instruments que possui todos os periféricos necessários e um Processador Digital de Sinais modelo F28335. A Figura 71 mostra o DSP utilizado no protótipo.

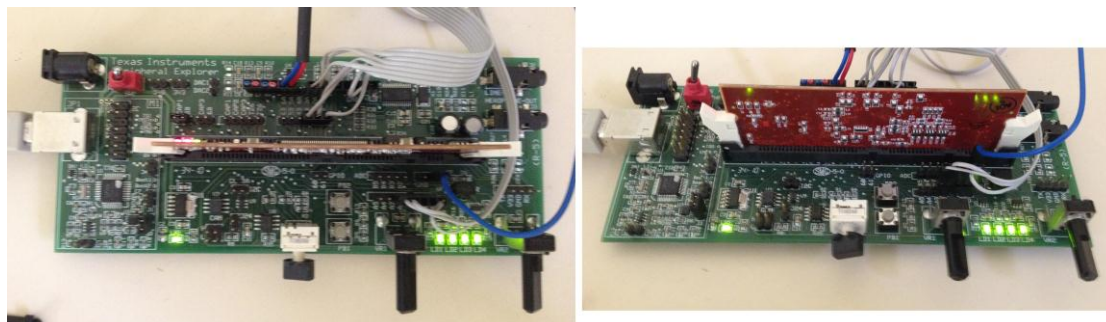


Figura 71 - DSP utilizado no Protótipo
Fonte: Autoria Própria

Esta placa de desenvolvimento com o DSP F28335 possui as principais características:

- 150 MHz de frequência
- Memória RAM de 68KB
- Memória Flash de 512KB
- 10 canais AD com 12 bits de resolução
- 12 saídas PWM

As entradas analógicas do DSP são realizadas no range de 0V a 3,3V, desta forma houve a necessidade do condicionamento dos sinais para a leitura de corrente. O circuito para aquisição e condicionamento das correntes será apresentado na sequência.

As saídas digitais do DSP também variam na faixa de 0V a 3,3V, portanto também houve a necessidade de um circuito de comando para os interruptores eletrônicos do módulo da SEMIKRON, uma vez que elas precisam sinais de 15V para entrarem em condução. O circuito para comando será apresentado na sequência.

A programação do DSP da Texas é realizada tradicionalmente por linhas de comando no ambiente de desenvolvimento do software Code Composer Studio também da Texas. No desenvolvimento deste trabalho a programação do DSP foi realizada através da geração automática de código.

A geração automática de código é feita através de *toolboxes* no ambiente Matlab/Simulink, no qual é possível acessar diretamente as entradas e saídas do DSP e realizar as operações desejadas em ambiente Matlab. Em seguida é realizada a compilação do programa e o código gerado é diretamente enviado ao

DSP. A Figura 72 revela um exemplo do ambiente de desenvolvimento da geração automática de código.

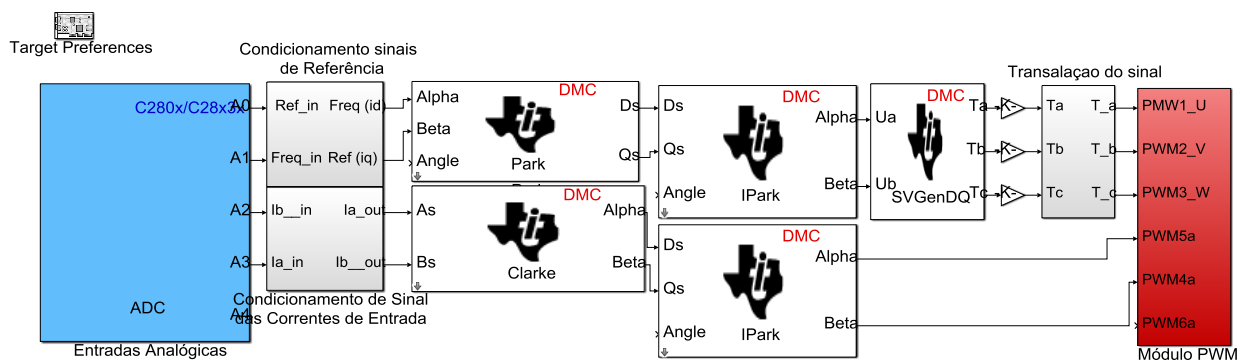


Figura 72 - Ambiente de Programação do DSP com Matlab
Fonte: Autoria Própria

6.3 CIRCUITO DE AQUISIÇÃO E CONDICONAMENTO DAS CORRENTES

Como comentado anteriormente, o módulo da SEMIKRON dispõe de sensores de efeito Hall da LEM (LAH 25-NP) nas fases A e B. A relação de corrente entre o primário e secundário deste transdutor de corrente é de 1:1000. Desta forma o valor de corrente na saída deveria ser convertido em tensão e ajustado ao nível de leitura da entrada analógica do DSP.

O circuito construído para a aquisição e condicionamento dos sinais de corrente foi adaptado de Baptista (2006) e é mostrado na Figura 73.

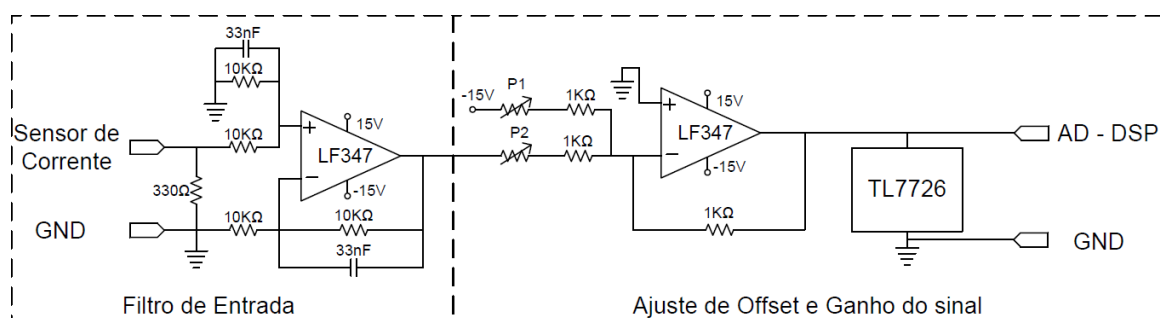


Figura 73 - Circuito de Leitura e Condicionamento das Correntes
Fonte: Autoria Própria

O circuito da figura é composto de duas etapas, sendo a primeira um filtro *anti-aliasing*, projetado segundo Baptista (2006). Esta etapa é responsável por transformar o sinal do sensor de corrente em tensão e filtragem.

A segunda etapa do circuito consiste em ajustar o ganho do sinal através do potenciômetro P2 (10k Ω) e adicionar um sinal de *offset* através do potenciômetro P1 (10k Ω). Desta forma, é possível adequar o sinal da leitura de corrente para a entrada do DSP. Para o circuito do filtro e do condicionamento foi utilizado o circuito integrado (CI) LF347 que possui 4 amplificadores operacionais.

Ao final do condicionamento do sinal foi adicionado o circuito integrado TL7726 para proteção da entrada AD do DSP. Este CI é um grampeador que satura em caso de tensões maiores ou menores de acordo com uma tensão de referência imposta a ele. Neste caso foi utilizada uma tensão de referência de 0V a 3,3V, evitando assim uma possível queima da entrada analógica do DSP.

A Figura 74 mostra a placa de aquisição de corrente para as fases A e B do gerador.

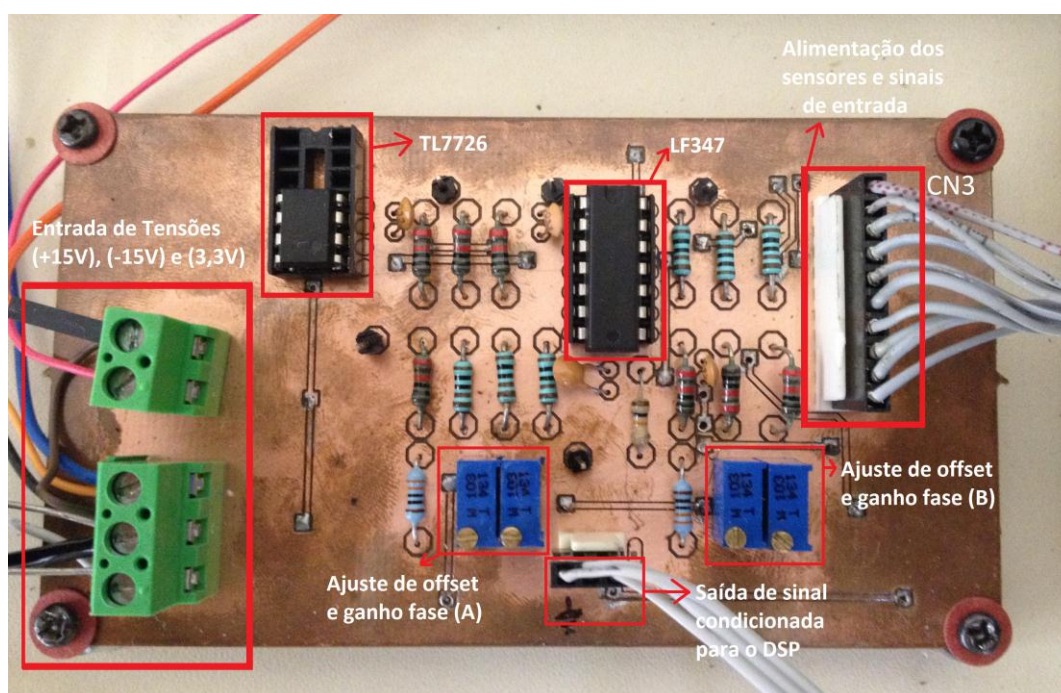


Figura 74 - Placa de Aquisição de Condicionamento das Correntes
Fonte: Autoria Própria

6.4 CIRCUITO DE COMANDO

Como anteriormente citado, os sinais de comando PWM gerados pelo DSP variam na faixa de 0V à 3,3V. As chaves eletrônicas do módulo conduzem quando a

elas são aplicadas tensões de 15V, desta forma houve a necessidade de uma placa de comando para as chaves.

O circuito de comando é relativamente simples, sendo inicialmente utilizado o CI 7407 que é um *buffer* com coletor aberto, onde na saída é conectado um resistor de *pull-up* a uma fonte 15V. Esta etapa condiciona o sinal de 3,3V para 15V.

Para proteção e garantia do sinal de 0V à 15V para as chaves foi adicionado um buffer (CI 4050). Este mesmo circuito foi reproduzido para o comando das 6 chaves do inversor. A Figura 75 revela o circuito utilizado para comando, enquanto a Figura 76 apresenta a placa confeccionado para o comando das chaves.

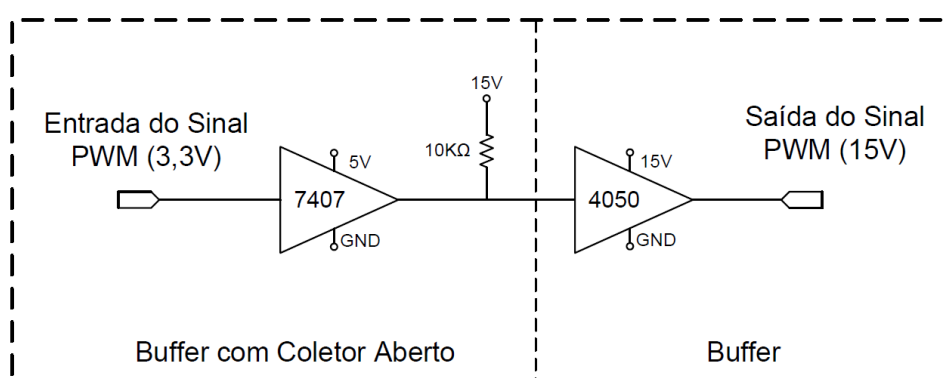


Figura 75 - Circuito de Comando
Fonte: Autoria Própria

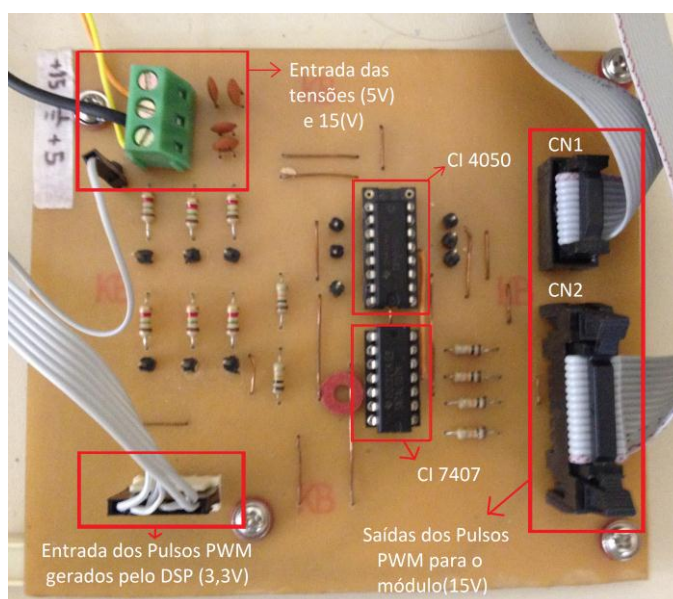


Figura 76 - Placa de Comando
Fonte: Autoria Própria

6.5 MEDIÇÃO E CIRCUITOS AUXILIARES

O DSP utilizado não possui saídas analógicas, desta forma para visualização e aquisição das variáveis calculadas no DSP, as mesmas foram enviadas a 3 saídas PWM e filtradas com um filtro RC. A Figura 77 mostra o filtro RC construído para visualização das variáveis em um osciloscópio.

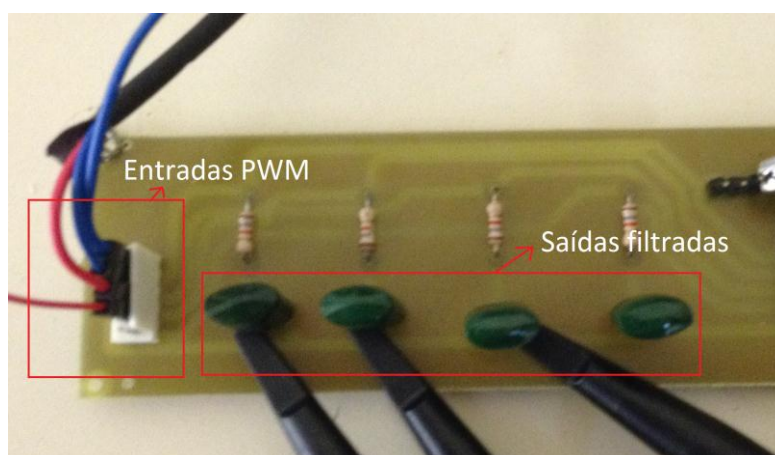


Figura 77 - Filtro RC
Fonte: Autoria Própria

Como visualizado anteriormente são necessários aos circuitos montados fontes de alimentação de 24V, +15V, -15V, 5V, 3,3V e 0V. A Figura 78 mostra as fontes auxiliares utilizadas e suas tensões de saída.

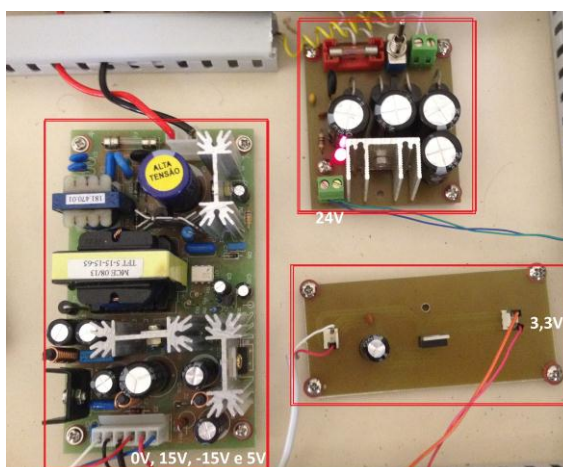


Figura 78 - Fontes Auxiliares
Fonte: Autoria Própria

6.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os principais componentes do hardware da bancada montada para os testes do trabalho. Inicialmente foi apresentado o módulo inversor utilizado na bancada e seu esquema elétrico.

Após a apresentação do módulo inversor, foi apresentado o DSP utilizado no trabalho e suas principais características, como número de entradas e saídas digitais, velocidade de processamento, etc.

Ainda foram apresentados os circuitos de aquisição de corrente e seu condicionamento, o circuito de comando das chaves e os circuitos auxiliares como fontes e um filtro RC para leituras das variáveis em no osciloscópio.

7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os testes realizados na bancada, foram inicialmente com o sistema operando em malha aberta.

O primeiro teste constituiu na geração dos tempos T_a , T_b e T_c gerados pelo bloco Space Vector PWM e mostrados na Figura 59. A Figura 79 revela as formas de ondas obtidas na saída do DSP com o filtro RC. Este primeiro teste foi realizado com uma tensão no barramento de 300V proveniente de uma fonte CC externa.

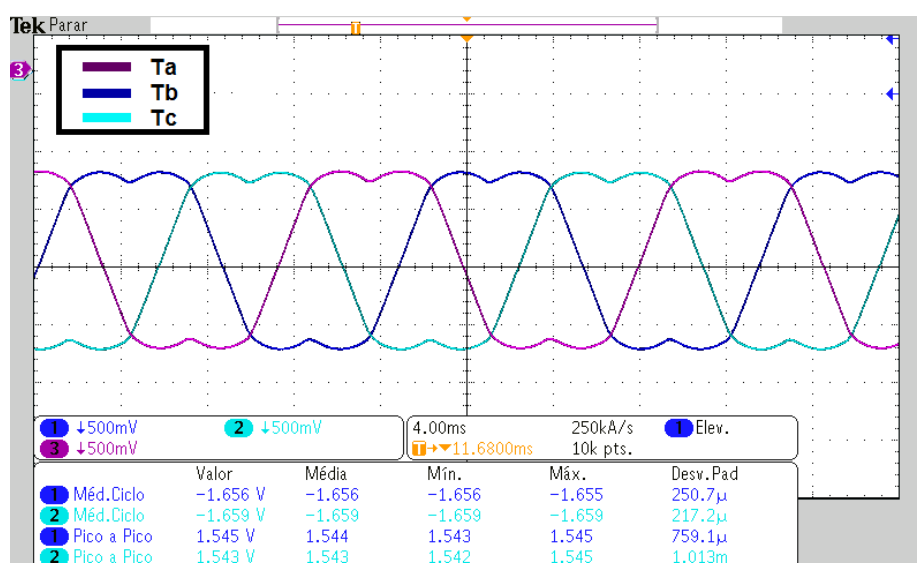


Figura 79 - Geração dos tempos T_a , T_b e T_c
Fonte: Autoria Própria

Após a geração dos tempos T_a , T_b e T_c foram testados os circuitos de aquisição das correntes i_a e i_b da máquina.

A corrente na fase A é mostrada na Figura 80, onde esta leitura é realizada através do DSP e, posteriormente, enviada à saída com filtro RC para leitura no osciloscópio. Nesta mesma figura pode-se observar a leitura realizada pelo DSP e a leitura real da corrente aferida através de uma ponteira de corrente conectada diretamente no osciloscópio. O mesmo comportamento ocorre para a corrente i_b . Observa-se que existe uma pequena diferença entre a corrente medida e a visualizada na saída do DSP, este fato deve-se pelo filtro implementado na saída PWM do DSP. Tal filtro introduz um pequeno atraso no sinal.

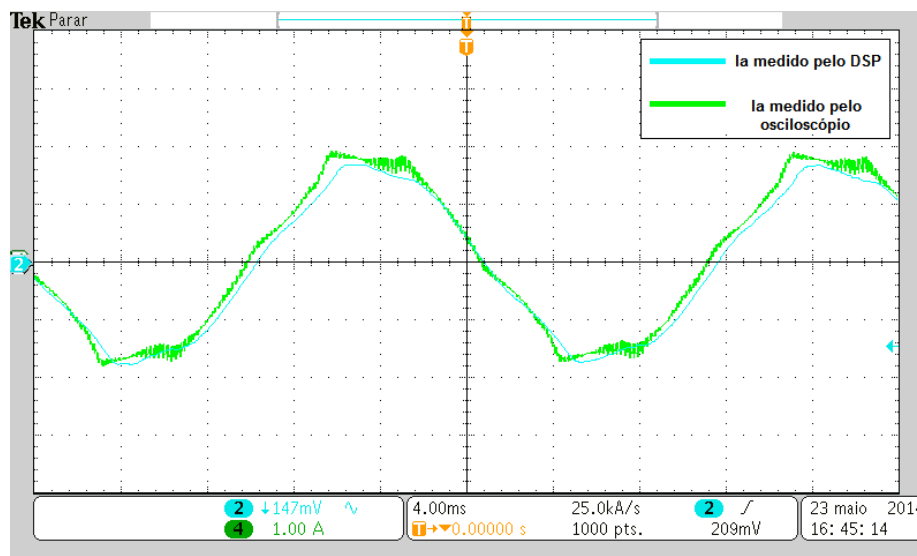


Figura 80 - Corrente i_a na fase do gerador
Fonte: Autoria Própria

Após as leituras correntes i_a e i_b , foi testado o bloco responsável pela transformada de Clark. A Figura 81 mostra as correntes i_α e i_β obtidas na saída do DSP.

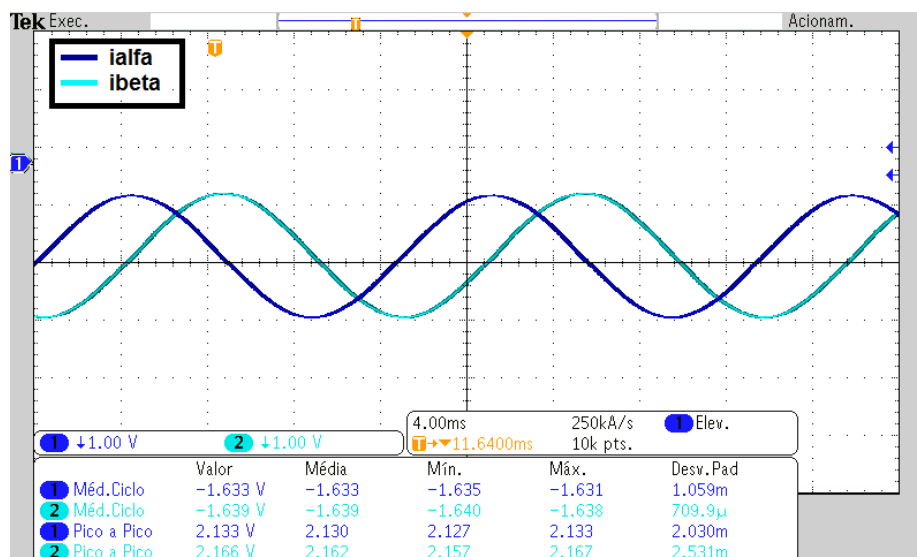


Figura 81 - Correntes i_α e i_β
Fonte: Autoria Própria

Após as aquisições das correntes i_α e i_β foi realizado o teste com o bloco da transformada de Park. Para este teste a posição de referência foi imposta por bloco gerador de rampa. A Figura 82 mostra as correntes i_d e i_q .

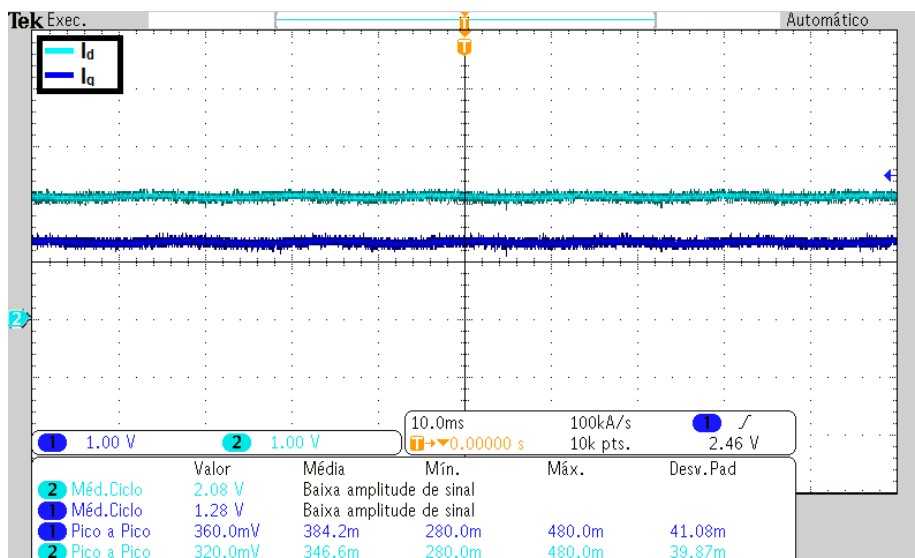


Figura 82 - Correntes i_d e i_q
Fonte: Autoria Própria

Após os teste com as medições de corrente, foi realizado a estimação de tensão, conforme descrito no item 4.2.2. Inicialmente, foram estimadas as tensões de linha aplicadas ao terminal da máquina. Para comprovar a eficácia da estimação, foram adquiridas as formas de onda da tensão estimada pelo DSP e a tensão real medida com uma ponteira de tensão isolada diretamente conectado ao osciloscópio. A Figura 83 apresenta a tensão V_{ab} estimada e a tensão V_{ab} na máquina medida nos terminais da máquina.

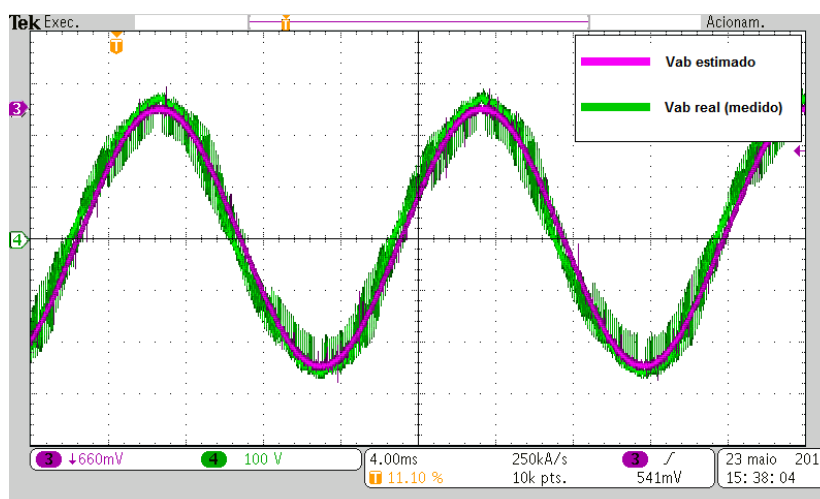


Figura 83 - Estimação da Tensão V_{ab}
Fonte: Autoria Própria

Uma vez estimadas as tensões de linha do sistema, foi realizado o cálculo para a estimação das tensões de fase. As tensões de fase são necessárias para o

cálculo do fluxo no rotor da máquina e obtenção da posição do mesmo. Para testar a estimação das tensões de fase aplicadas á máquina, foi realizado o mesmo procedimento de análise das tensões de linha. A tensão de fase estimada e medida foram verificadas em uma mesma tela no osciloscópio, conforme apresentado na Figura 84.

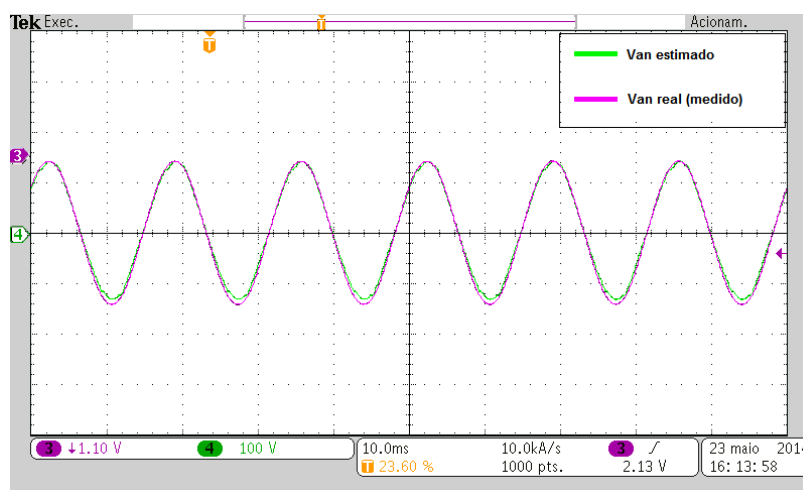


Figura 84 - Tensão de fase V_{an} estimada
Fonte: Autoria Própria

Após a realização dos testes para aquisição de corrente e suas transformadas, foi realizado teste em malha fechada com as correntes. Para tal teste foi imposta uma posição para a geração dos tempos T_a , T_b e T_c e também foi realizado o controle sobre as correntes i_d e i_q , conforme descrito no Capítulo 3.

Para o teste da dinâmica das malhas de corrente, um degrau foi imposto de 0 para 0,1 pu. Observa-se na Figura 85 o comportamento da corrente i_d , bem como a corrente aferida com uma ponteira diretamente na fase A do gerador. Pode-se notar que o tempo para estabilização da malha de corrente é aproximadamente 10ms. O mesmo comportamento foi visualizado para corrente i_q .

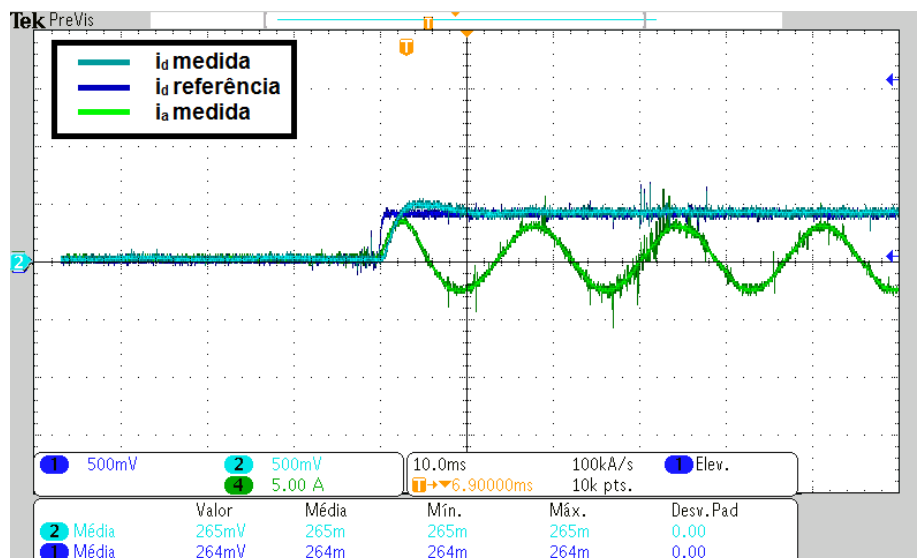


Figura 85 - Dinâmica da malha de corrente i_d
 Fonte: Autoria Própria

Após os testes em malha fechada de corrente, foi realizada a estimação do fluxo no rotor da máquina como descrito no item 4.2.1. Na Figura 86 observam-se os fluxos Ψ_d e Ψ_q estimados no rotor da máquina. Observa-se que o fluxo na direção q está em zero, assim como visualizado em simulação. Já o fluxo na direção d corresponde ao fluxo resultante do rotor.

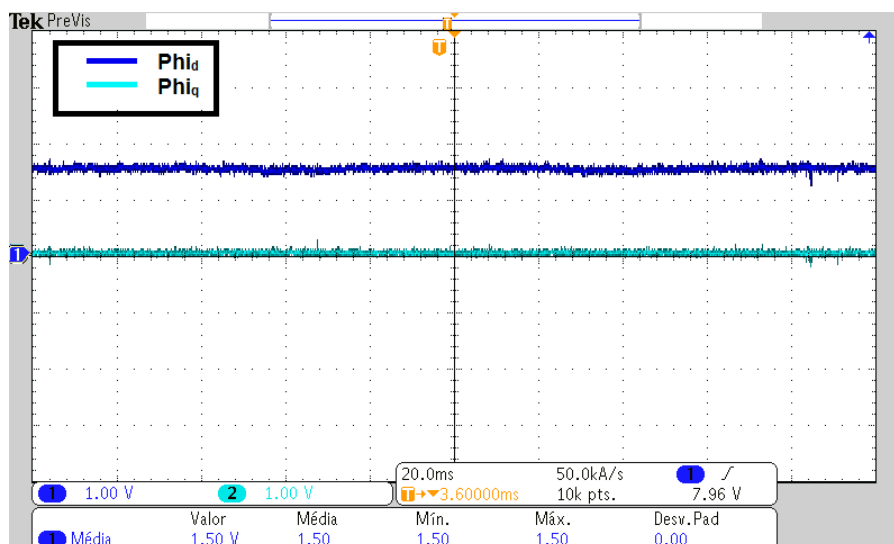


Figura 86 - Fluxo no ψ_d e ψ_q no rotor
 Fonte: Autoria Própria

Após a estimação dos fluxos foi obtida a posição do fluxo do rotor. A Figura 87 mostra a tensão Ψ_q o fluxo (Ψ_α) no rotor e sua posição.

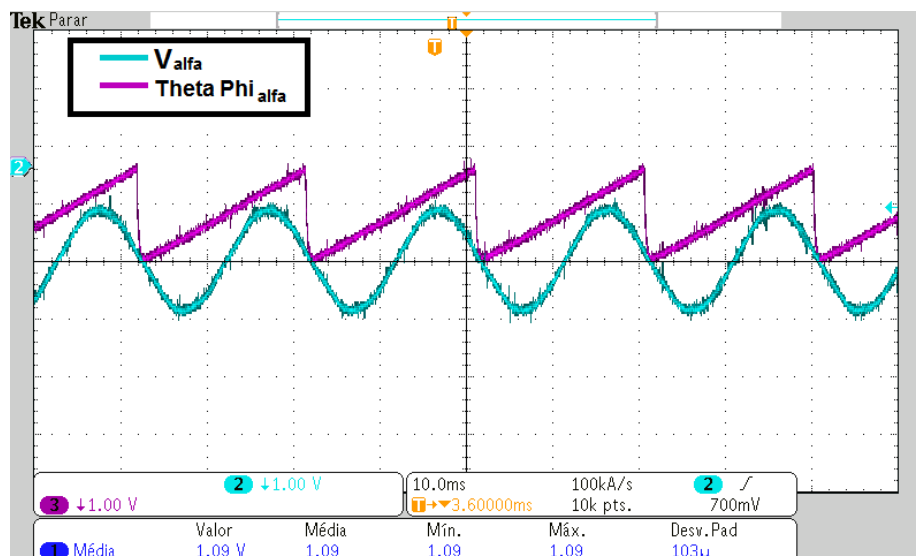


Figura 87 - Fluxo e posição no Rotor
Fonte: Autoria Própria

Observa-se na Figura 86 o alinhamento dos fluxos d e q com o sistema de eixos dq girantes, tal que, o fluxo resultante no rotor está na direção d . Neste momento o gerador opera com a filosofia do controle vetorial, onde o fluxo do rotor e o torque eletromagnético estão desacoplados.

Uma vez estimado o fluxo da máquina de indução, foram realizados testes para comprovarem a robustez da malha de fluxo do rotor. Inicialmente, foi imposto um valor de 0,3pu (1pu = 0,4775Wb) e em seguida aplicado um degrau para 0,6. A Figura 88 demonstra o degrau aplicado, na qual é possível visualizar o comportamento da malha de fluxo.

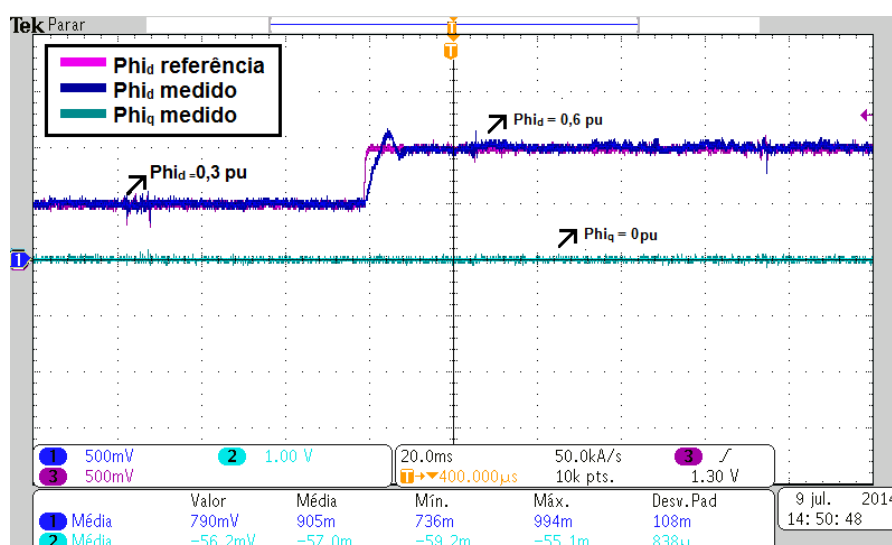


Figura 88 - Degrau de fluxo
Fonte: Autoria Própria

Nota-se claramente nesta figura que o valor do fluxo medido segue o valor do fluxo Ψ_d de referência. Ainda nota-se que o fluxo Ψ_q é sempre mantido em zero, garantindo o desacoplamento.

Na Figura 89 observa-se no momento do degrau de referência de fluxo, o comportamento dos fluxos ψ_α e ψ_β .

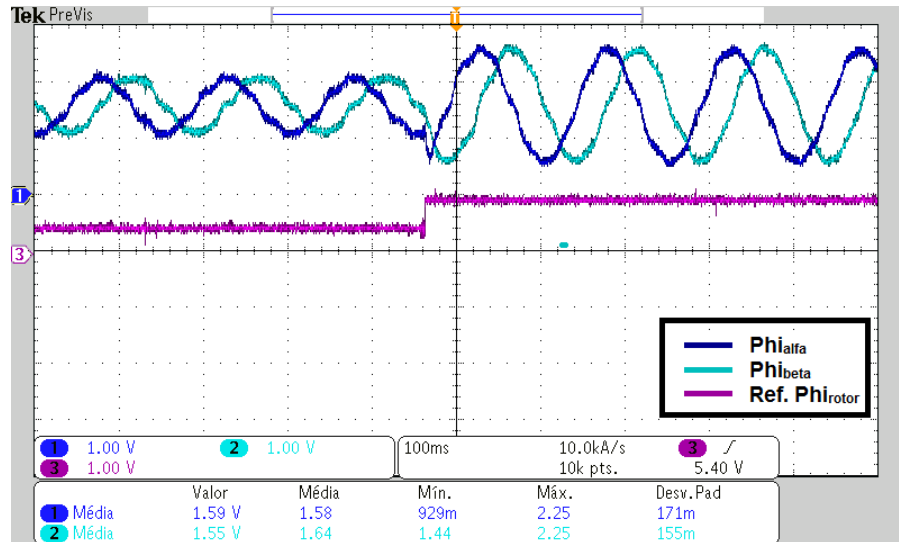


Figura 89 - Fluxos ψ_α e ψ_β durante o degrau
Fonte: Autoria Própria

Os testes com a malha de velocidade foram baseados no método de estimação de velocidade descrito no item 4.2.4.

Inicialmente, foram realizados alguns testes impondo a referência de velocidade e medindo a velocidade com um tacômetro. Num primeiro teste foi imposto o valor 0,5pu de velocidade ($1\text{pu} = 377\text{rad/s}$).

A Figura 90 revela a referência da velocidade imposta e a frequência da corrente i_a medida no gerador de 30Hz, para esta condição a velocidade medida foi de 900rpm.

O mesmo teste foi realizado para uma referência de 1pu. Na Figura 91 se observa a referência de velocidade e a corrente i_a . Para esta condição a medida de velocidade no eixo foi de 1800rpm.

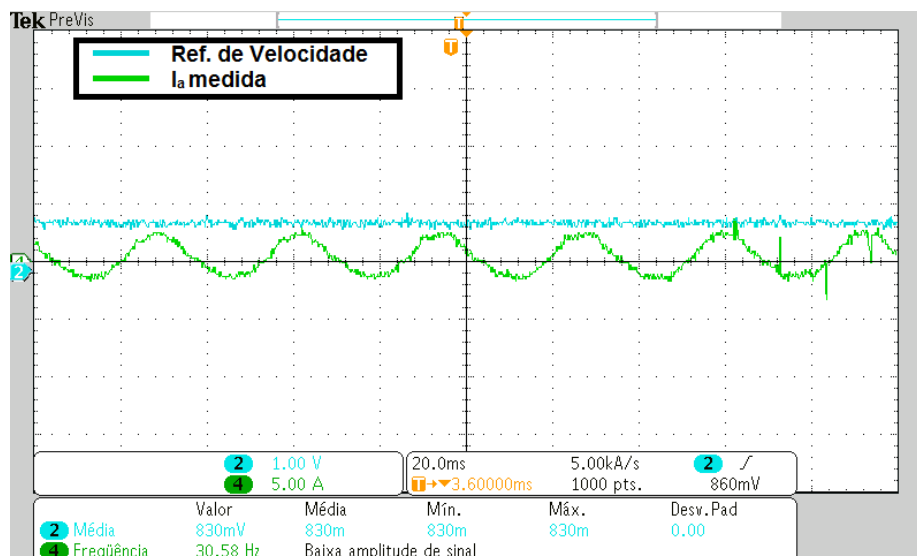


Figura 90 - Teste com 0,5pu de velocidade
Fonte: Autoria Própria

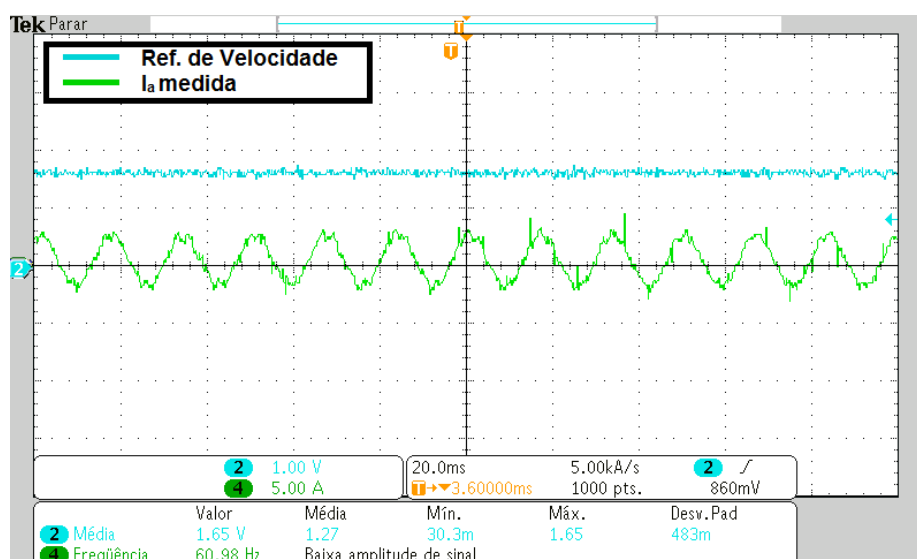


Figura 91 - Teste com 1pu de velocidade
Fonte: Autoria Própria

Para comprovar a dinâmica da malha de velocidade, foi realizado um degrau na referência de 0,6pu para 0,7pu.

Na Figura 92 observa-se a referência de velocidade e a velocidade medida. Na mesma figura é possível visualizar o comportamento da corrente i_a durante o transitório do degrau da velocidade.

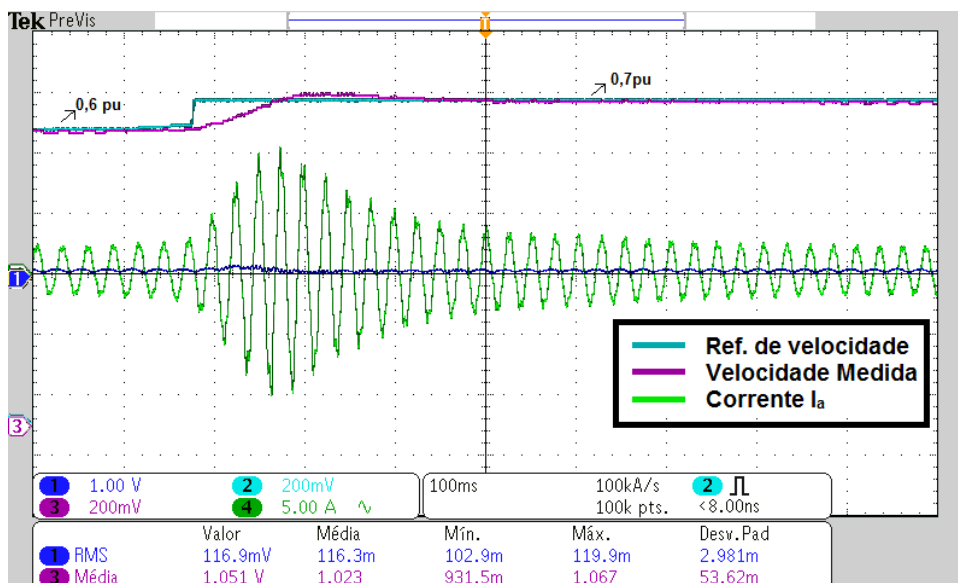


Figura 92 - Dinâmica da malha de velocidade
Fonte: Autoria Própria

Os testes para comprovar a operação da máquina de indução como gerador foi realizado utilizando o motor de corrente contínua como emulador da turbina, e um sistema com um retificador para impor a tensão no barramento conforme mostrado na Figura 93.

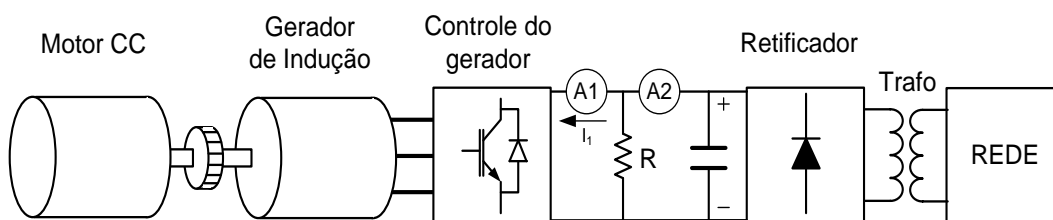


Figura 93 - Esquema para operação do gerador
Fonte: Autoria Própria

Neste esquema foi fixado uma tensão no barramento CC de 400V com uma carga de 60Ω. A corrente fornecida pelo retificador é medida pelo amperímetro A_2 enquanto que o amperímetro A_1 mede a corrente na entrada do conversor do lado do gerador. Este teste foi realizado para possibilitar a operação do sistema como gerador, uma vez que não foi possível neste trabalho a implementação do conversor do lado da rede. Entretanto, com o sistema apresentado na Figura 93 é possível comprovar a operação do sistema de controle da máquina de indução operando na condição de gerador.

Inicialmente, a máquina de indução foi ligada como motor, desta forma consumindo energia proveniente do retificador. Após a máquina operar como motor foi acionado o motor de corrente contínua para emular o comportamento da turbina eólica. Foram testados alguns pontos de velocidade para esta condição.

A Figura 94 revela o comportamento do sistema, no qual inicialmente o mesmo opera como motor. A corrente é positiva medida pelo amperímetro A_1 , mostrado na Figura 93.

No momento em que ocorre o acionamento do motor CC é possível visualizar a transição da corrente positiva (motor) para corrente negativa (gerador). Neste momento, o sistema de controle proposto neste trabalho, inicia-se a operação como gerador alimentado a carga R.

A Figura 94 mostra o comportamento da corrente medida na entrada do conversor na condição motora e na condição de gerador para diferentes velocidades de operação.

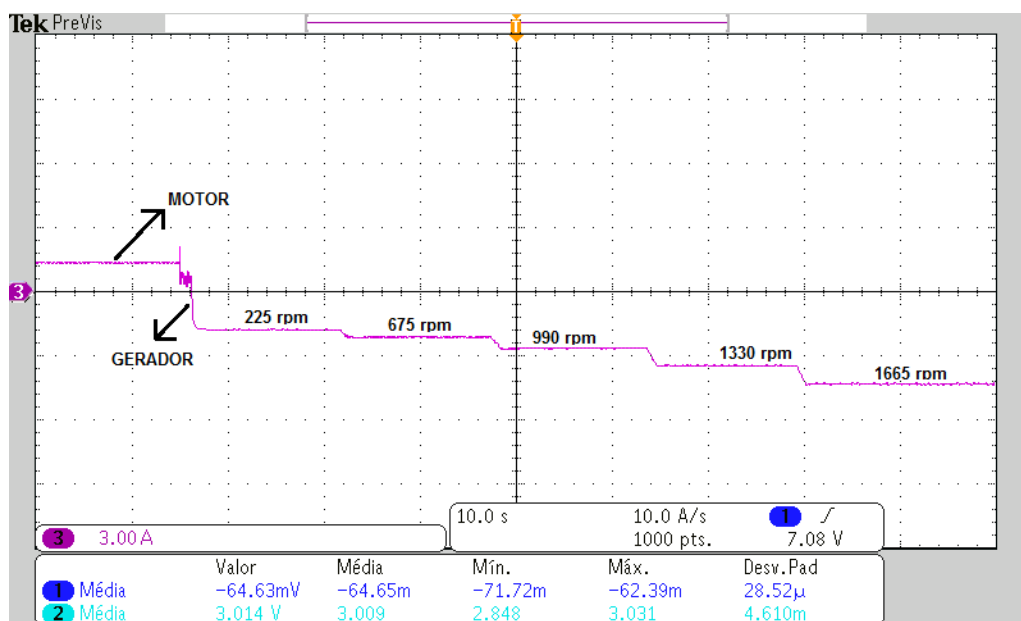


Figura 94 – Comportamento da corrente I1 para diferentes velocidades de operação do gerador
Fonte: Autoria Própria

A Figura 95 mostra o esquema implementado em laboratório.



Figura 95 - Sistemas montado em laboratório para operação do sistema como gerador
Fonte: Autoria Própria

7.1 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordados os principais resultados obtidos com o protótipo construído, onde foi possível comprovar os resultados obtidos em simulação. Inicialmente, foi possível visualizar as transformadas de Park e Clark para o sistema operando em malha aberta.

Após os testes com as correntes foram estimadas as tensões nos terminais da máquina. Tal estimação foi satisfatória, uma vez que os valores estimados foram compatíveis com os valores medidos, desta forma descarta-se o uso de sensores de tensão.

Uma vez estimadas as tensões da máquina, foram realizados teste em malha fechada de corrente, onde também se comprovou a eficiência da malha de acordo com o projeto realizado.

Foram realizados testes para a estimação do módulo e posição do fluxo no rotor da máquina bem como a dinâmica da malha de fluxo.

Após a estimação do fluxo foi realizado o teste para o método de estimação de velocidade e a sua dinâmica.

Por fim foi montado um sistema para observar a transição da operação como motor para gerador para diversas velocidades.

8 CONCLUSÃO GERAL

O trabalho alcançou seu objetivo de implementação em simulação de um sistema eólico capaz de operar em velocidade variável. Também foi desenvolvida uma bancada em laboratório de um sistema eólico baseado no gerador de indução com rotor em gaiola.

O capítulo 2 abordou toda a modelagem e simulação da turbina eólica, que considera seus aspectos aerodinâmicos. Neste capítulo os principais pontos de destaques foram às obtenções das curvas de potência, nas quais é possível observar a necessidade de um sistema de rastreamento de máxima potência.

Nos capítulos 3 e 4 foram discutidas as estratégias de controle para o conversor do lado da rede e para o conversor do lado do gerador. Através de simulações foi possível validar tais estratégias. Foram realizados vários testes para comprovar a dinâmica de ambos os conversores, onde os resultados obtidos foram satisfatórios.

O capítulo 5 integra o sistema operando como um todo, apresentando a simulação desde a modelagem da turbina eólica até a extração de potência para a rede elétrica.

No capítulo 6 foi demonstrada a construção do protótipo, e foi através dele que foi validada a estratégia de controle do gerador proposta neste trabalho. O capítulo 7 trouxe os resultados experimentais obtidos com o protótipo.

Com a realização deste trabalho surgiram várias dúvidas, questionamentos e esclarecimentos importantes à formação como pesquisador da área. Ainda é importante destacar a contribuição e ajuda deste trabalho a outros pesquisadores do campo de controle de máquinas.

O desenvolvimento do sistema em simulação pode surgir de base para outros pesquisadores da área bem como despertar novas propostas de melhorias para o sistema já implementado.

A geração de códigos automática para processadores digitais de sinais através de ambiente Matlab/Simulink é um importante avanço para pesquisadores que necessitam realizar diversos cálculos em um sistema, sem a necessidade de conhecimentos profundos de programação. Desta forma trabalhos que envolvem grande complexidade de cálculos podem ser implementados em um menor tempo.

Os esquemas elétricos apresentados para aquisição e condicionamento de corrente também contribuem a outros pesquisadores, pois podem ser facilmente implementados para outras pesquisas.

Cientificamente o trabalho contribui para a pesquisa de aerogeradores, pois basicamente com dois sensores de corrente é possível controlar vetorialmente o conversor do lado gerador, se tornando um sistema robusto e barato.

Com os testes realizados em laboratório foi possível verificar a operação do sistema como gerador eólico, onde foi emulada uma turbina através de uma máquina CC. Para diversas velocidades de referência foi possível verificar a extração de potência para a carga, ficando evidente que o objetivo do trabalho foi alcançado com êxito, uma vez que o foco deste trabalho foi o desenvolvimento do controle vetorial para um gerador de indução com rotor em gaiola.

Como resultados acadêmicos deste trabalho foram gerados 3 artigos acadêmicos publicados no INDUSCON 2012 e 2014.

Com a realização dessa dissertação é deixado ao Centro de Pesquisas Eletrônicas da UTFPR – Ponta Grossa, um protótipo para realização de testes com geradores a indução, podendo ser utilizado para outros trabalhos de mestrado.

Pode-se sugerir como trabalhos futuros ao protótipo:

- Construção do Hardware para o controle do lado da rede;
- Aplicação de outras técnicas de controle para o sistema;
- Utilização de outro tipo de gerador como o duplamente alimentado;
- Desenvolvimento de sistema supervisor com aquisições em tempo real.

REFERÊNCIAS

AZZOLIN, Rodrigo Z. et al. **CONTROLE VETORIAL SENSORLESS DO MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO APLICADO A COMPRESSORES HERMETICOS DE REFRIGERAÇÃO**. Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande, p. 1-1. set. 2012.

BATISTA, Flávio Alberto Bardemaker. **MODULAÇÃO VETORIAL APLICADA A RETIFICADORES TRIFÁSICOS PWM UNIDIRECIONAIS**. Florianópolis, 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

BATZEL, Todd D.; COMANESCU, Mihai. **Instantaneous Voltage Measurement in PWM Voltage Source Inverters**. IEEE, 2007.

BAZZO, Thiago de Paula Machado. **IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLE VETORIAL EM GERADORES ASSÍNCRONOS**. 2007. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

BOSE, Bimal K. **Modern Power Eletronics and AC Drives**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

CAD, Marcelo Machado. **Estratégias de Modelagem Dinâmica e Simulação Computacional do Motor de Indução Trifásico**. 2000. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Departamento de Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CARLSSON, Anders. **The Back-to-back converter: control and design**. Department Of Industrial Electrical Engineering And Automation - Lund Institute Of Technology: Printed In Sweden By Reprocentralen, Lund, 1998. 114 p.

CRESEB - Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Breito. **Tutorial de Energia Eólica**. 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial_eolica>. Acesso em: 30 set. 2013.

ENERGY, Brazil. Brazil Wind. 2014. Disponível em: <<http://brazilenergy.com.br/portfolio/brazil-wind/historico/>>. Acesso em: 25 out. 2013.

GOMES, Carlos Eduardo Marcussi. **CONTROLE DIGITAL DE UM CONDICIONADOR DE TENSÃO ALTERNADA USANDO PLL PARA OBTENÇÃO DO SINAL DE REFERÊNCIA**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

HEIER, S. **Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems**. John Wiley & Sons Ltd, 1998.

IOV, F., Hansen, A. D., Sorensen, P., Blaabjerg, F., 2004, **Wind Turbine Blockset in MATLAB/Simulink: General Overview and description of the models**, Aalborg University, Aalborg, Dinamarca.

KRAUSE, P.C., O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, **Analysis of Electric Machinery**, IEEE Press, 2002

MOHAN, Ned. **Advanced Electric Drives: Analysis, Control and Modeling using Simulink**. Minnessota - Usa: Mnpere, 2001.

REIS, Mônica Magalhães. **SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE PARA INTERLIGAÇÃO À REDE ELÉTRICA**. 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

SEMIKRON. Datasheet Archive. Disponível em:
<[http://www.datasheetarchive.com/semikron sk 240-datasheet.html](http://www.datasheetarchive.com/semikron_sk_240-datasheet.html)>. Acesso em: 10 maio 2013.

SENA, Alexander Patrick Chaves. **ESTRATÉGIA PARA ESTIMAÇÃO DO CONJUGADO ELETROMAGNÉTICO DE MOTORES DE INDUÇÃO**. 2011. 120f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

SENJYU, T et al. **Speed and Position Sensor-less Maximum Power Point Tracking Control for Wind Generation System with Squirrel Cage Induction Generator**. Power Systems Conference And Exposition, 2006. Psce '06. 2006 IEEE Pes. Atlanta, Ga, p. 2038-2043. nov. 2006.

SENJYU, Tomonobu; OCHI, Yasutaka; SEKINE, Hideomi. **Speed and Position Sensor-less Maximum Power Point Tracking Control for Wind Generation System with Squirrel Cage Induction Generator**: In: POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2006, Atlanta.

SUEBKINORN, W., NEAMMANEE, B. INDUSTRIAL ELECTRONICS AND APPLICATIONS (ICIEA), 2011 6TH IEEE CONFERENCE ON, 2011, Beijing. **An implementation of field oriented controlled SCIG for variable speed wind turbine**. Beijing, 2011. 5 p.

TECSIS. Disponível em: <<http://www.tecsis.com.br/site/wind.php>>. Acesso em: 30 set. 2013.

TRZYNADLOWSKI, A. M., **The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors**, Kluwer Academic Publishers, 1994, pp. 176-180.

VÉRTEOLE. Disponível em: <<http://www.verteole.fr/>>. Acesso em: 15 out. 2013.

VOLTOLINI, Hélio. **Modelagem e Controle de Geradores de Indução Duplamente Alimentados com aplicação em Sistemas Eólicos**. Florianópolis, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, GRUCAD, Universidade Federal de Santa Catarina.

VOLTOLINI, Hélio; CARLSON, Renato. **Grid Synchronization and Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Generation System with Brushless Doubly Fed Induction Generator**. In: IECON IEEE, Orlando – Florida, 2008.

ZHE, Chen ; GUERRERO, J.M. ; BLAABJERG, F. **A Review Of The State Of The Art Of Power Electronics For Wind Turbines**. IEEE Transactions On Power Electronics. v. 24, 8 ago. 2009.

APÊNDICE A - Dados do sistema eólico

- Dados do Gerador Eólico

Potência: 3kW

Tensão: 220V

Número de Pólos: 4

Frequência: 60Hz

- Parâmetros dos Enrolamentos

$R_s: 1,115\Omega$

$R_r: 1.083\Omega$

$L_s: 0,2097H$

$L_r: 0,2097H$

$L_m: 0,2037H$

$J: 0,02kgm^2$

- Dados do Conversor da Rede

L: 10mH

R: 0,1 Ω