



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ÂNGELO MARCÍLIO MARQUES DOS SANTOS

**GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA A PARTIR
DE GERADOR DE INDUÇÃO EM GAIOLA DE ESQUILO**

SOBRAL

2018

ÂNGELO MARCÍLIO MARQUES DOS SANTOS

GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA A PARTIR DE
GERADOR DE INDUÇÃO EM GAIOLA DE ESQUILO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Adson Bezerra
Moreira

SOBRAL

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S239g Santos, Ângelo Marcílio Marques dos.
Geração de energia eólica conectada à rede elétrica a partir de gerador de indução em gaiola de esquilo /
Ângelo Marcílio Marques dos Santos. – 2018.
93 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira.

1. Geração de energia elétrica. 2. Energia eólica. 3. GIGE. 4. Conversor eletrônico back-to-back. 5. Projeto de controladores. I. Título.

CDD 621.3

ÂNGELO MARCÍLIO MARQUES DOS SANTOS

GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA A PARTIR DE
GERADOR DE INDUÇÃO EM GAIOLA DE ESQUILO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dra. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Larissa Souza Pereira
Eng.^a Eletricista

A Deus

Ao meu pai Agenor Daniel

À minha mãe Rita Marques

Ao meu irmão Ângelo Marcelo

A minha namorada Thallita Viana

Eu dedico esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser essencial em minha vida, autor do meu destino, meu guia, socorro bem presente na hora da angústia. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

Ao meu Pai Agenor Daniel, cuja presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

À minha mãe Rita Marques, cujo o cuidado e dedicação me deram a esperança para seguir.

Ao meu irmão Ângelo Marcelo, e sua família, que sempre me ajudou no que precisei.

À todos os meus demais familiares que sempre me apoiaram durante todo este período.

À minha namorada Thallita Viana que esteve comigo durante essa jornada.

Ao Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira pela valiosa orientação, otimismo e por acreditar em mim no desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos e colegas de graduação, em especial Josa Vidal e Nathanael Soares, por sempre me auxiliarem e prestarem ajuda nas disciplinas e em vésperas de provas. Também aos amigos Raquel Silva, Marcos Vinícius, Ricardo Parcelle, Ildenor Júnior, Willian Withi, Álef Castro, pelo companheirismo, momentos de descontração, colaboração e trocas de experiências durante essa jornada universitária.

A todos os meus demais amigos, em especial Admilson Santos, Daniel Duarte, Erik Johnny, Romário Patrício, Marília Bezerra, Maria Francisca, que contribuíram direta ou indiretamente para que esse sonho se tornasse realidade.

Aos membros da banca examinadora pelos comentários, sugestões e contribuições que tornaram melhor a qualidade deste trabalho.

À Coordenação de Assistência Estudantil da Universidade Federal do Ceará campus Sobral por toda a assistência prestada durante o curso.

Ao Programa de Aprendizagem Cooperativa em Células Estudantis (PACCE) de Sobral, em especial ao Professor Emanuel Benevenuto e a Professora Rita Helena, por todo o conhecimento compartilhado e a possibilidade de uma nova visão de mundo e de universidade.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template*

utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

“Não te mandei eu? Esforça-te, e tem bom ânimo;
não temas, nem te espantes; porque o Senhor teu
Deus é contigo, por onde quer que andares.”

(Bíblia Sagrada: Josué 1:9)

RESUMO

O objetivo deste trabalho é estudar e compreender um sistema de geração de energia eólica conectado à rede elétrica, em que é utilizado um gerador de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo (GIGE) aplicado a sistemas eólicos. A conexão com a rede elétrica é realizada por meio da utilização de um filtro L. Os terminais do estator do GIGE são conectados à rede elétrica antes do filtro utilizando uma topologia de conversores eletrônicos de potência CA/CC/CA, denominada *back-to-back*, enquanto que os terminais do rotor são curto circuitados, de modo que são apresentadas neste trabalho as técnicas de controle de potências ativa e reativa do GIGE. É apresentado o controle do conversor do lado da rede elétrica (CLR), responsável pelo controle de potências e por manter a tensão do barramento CC constante. Apresenta-se também o controle do conversor do lado do gerador (CLG), em que se utiliza o controle vetorial em função das variáveis do rotor, de modo que o GIGE seja controlado através das referências de torque e de corrente de magnetização. O sistema estudado foi modelado matematicamente, e simulado com o uso do software MatLab/Simulink para verificar sua viabilidade técnica.

Palavras-chave: Geração de energia elétrica. Energia eólica. GIGE. Conversor eletrônico back-to-back. Projeto de controladores.

ABSTRACT

The present work is an implementation in simulation of an wind energy generation system connected to electric grid, in which a three-phase induction generator with a squirrel cage rotor (SCIG) is applied to wind power systems. The connecting to the mains is accomplished by using an L filter. The SCIG stator terminals are connected to the mains before the filter using an AC/DC/AC power converter topology, called back-to-back, while the rotor terminals are short circuited, so that the SCIG's active and reactive power control techniques are presented. The control of grid side converter (GSC) is presented, responsible for the power control and also for keeping the DC bus voltage constant. The control of induction generator side converter (IGSC) is presented also, in which vector control is used in rotor variables, so that the SCIG is controlled through the torque references and magnetizing current. The studied system was mathematically modeled and simulated using MatLab/Simulink software to verify its technical viability.

Keywords: Electric power generation. Wind Energy. SCIG. Electronic back-to-back converter. Controllers design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Potencial eólico brasileiro a uma altura de 50m	17
Figura 2 – Componentes de um sistema de geração eólica	18
Figura 3 – Gerador de indução de gaiola de esquilo conectado diretamente à rede elétrica	19
Figura 4 – Gerador de indução de gaiola de esquilo conectado à rede elétrica através de filtro L	20
Figura 5 – Sistema eólico estudado	21
Figura 6 – Conversor eletrônico CC-CA trifásico conectado à rede elétrica através de filtro L	24
Figura 7 – Esquemático do conversor do lado da rede, que controla a energia ativa e reativa através de corrente em coordenadas dq	28
Figura 8 – Diagrama de blocos do controle do PLL	29
Figura 9 – Diagrama esquemático do PLL	30
Figura 10 – Sistema de controle de corrente do conversor do lado da rede	33
Figura 11 – Diagrama de blocos do controle da tensão do barramento CC	34
Figura 12 – Diagramas de blocos simplificados dos controladores de corrente elétrica do CLR com filtro L em coordenadas dq	35
Figura 13 – Resposta em frequência de malha aberta do controle das correntes elétricas i_d e i_q do CLR	37
Figura 14 – Diagrama de blocos simplificado do controle de tensão elétrica do barramento CC	39
Figura 15 – Resposta em frequência de malha aberta do controlador de tensão elétrica do barramento CC do CLR	40
Figura 16 – Máquina de indução simétrica bipolar, trifásica e em estrela	42
Figura 17 – Circuitos equivalentes em coordenadas dq para uma máquina de indução trifásica e simétrica	49
Figura 18 – Diagrama esquemático do sistema para controlar o GIGE	51
Figura 19 – Observador de fluxo	56
Figura 20 – Controle vetorial do GIGE em coordenadas campo do rotor	57
Figura 21 – Circuito equivalente da máquina de indução	58
Figura 22 – Sistema de controle de corrente do conversor do lado do gerador	62

Figura 23 – Diagramas de blocos simplificados dos controladores de corrente elétrica do CLG em coordenadas dq	62
Figura 24 – Resposta em frequência de malha aberta do controlador de correntes elétricas do CLG	64
Figura 25 – Sistema de geração eólica completo	65
Figura 26 – Diagrama montado no Matlab/Simulink do Sistema de geração eólica completo	65
Figura 27 – Tensão da rede elétrica V_{sa} e tensões V_d e V_q obtidas a partir do PLL	67
Figura 28 – Tensão da rede elétrica V_{sa} , frequência da rede elétrica e ângulo teta (θ) obtido a partir do PLL	67
Figura 29 – Corrente de eixo direto de referência e corrente de eixo direto medida	67
Figura 30 – Corrente de eixo em quadratura de referência e corrente de eixo em quadratura medida	68
Figura 31 – Tensão de referência do barramento CC e tensão medida no barramento CC	69
Figura 32 – Corrente de magnetização de referência e corrente de magnetização medida do gerador	70
Figura 33 – Torque de referência e torque medido do gerador	70
Figura 34 – Corrente de eixo direto de referência do estator e corrente de eixo direto do estator medida	71
Figura 35 – Corrente de eixo em quadratura de referência do estator e corrente de eixo em quadratura medida do estator	72
Figura 36 – Potência fornecida à rede elétrica	72
Figura 37 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema	74
Figura 38 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema entre 4,95 s a 5,0 s	74
Figura 39 – Rampa de velocidade do rotor do GIGE de 96 rad/s a 154 rad/s	75
Figura 40 – Tensão da rede elétrica V_{sa} e tensões V_d e V_q obtidas a partir do PLL	76
Figura 41 – Tensão da rede elétrica V_{sa} , frequência da rede elétrica e angulo teta (θ) obtido a partir do PLL	76
Figura 42 – Corrente de eixo direto de referência e corrente de eixo direto medida	77
Figura 43 – Corrente de eixo em quadratura de referência e corrente de eixo em quadratura medida	77
Figura 44 – Tensão de referência do barramento CC e tensão medida no barramento CC	77

Figura 45 – Corrente de magnetização de referência e corrente de magnetização medida do gerador	78
Figura 46 – Torque de referência e torque medido do gerador	78
Figura 47 – Corrente de eixo direto de referência do estator e corrente de eixo direto do estator medida	79
Figura 48 – Corrente de eixo em quadratura de referência do estator e corrente de eixo em quadratura medida do estator	79
Figura 49 – Potência fornecida à rede elétrica	80
Figura 50 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema	81
Figura 51 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema entre 4,95 s a 5,0 s	81
Figura 52 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema entre 5,5 s a 6,0 s	82
Figura 53 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema entre 6,95 s a 7,0 s	83
Figura 54 – PLL implementado no software MatLab/Simulink.	89
Figura 55 – Sistema de controle de corrente do CLR implementado no software MatLab/Simulink.	89
Figura 56 – Controle de tensão do barramento CC implementado no software MatLab/Simulink.	90
Figura 57 – Observador de fluxo implementado no software MatLab/Simulink.	91
Figura 58 – Controle vetorial implementado no software MatLab/Simulink.	91
Figura 59 – Sistema de controle de corrente do CLG implementado no software MatLab/Simulink.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da máquina de indução.	88
Tabela 2 – Parâmetros do conversor de potência Back to Back.	88
Tabela 3 – Parâmetros do lado da rede elétrica.	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	21
1.2	Justificativa	21
1.3	Metodologia	22
1.4	Organização do trabalho	22
2	MODELAGEM E CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE	24
2.1	Modelagem do Conversor do Lado da Rede (CLR)	24
2.2	Sistema de controle do Conversor do Lado da Rede (CLR)	27
2.2.1	<i>PLL (Phase Locked Loop)</i>	27
2.2.2	<i>Controle de corrente do CLR</i>	30
2.2.3	<i>Controle de tensão do barramento CC</i>	33
2.3	Projeto dos controladores	34
2.3.1	<i>Projeto de controladores do controle de corrente do CLR em coordenadas dq</i>	35
2.3.2	<i>Projeto de controladores do controle de tensão do CLR</i>	38
2.3.3	<i>Projeto do controlador do controle do PLL (Phase Locked Loop)</i>	40
3	MODELAGEM DA MÁQUINA E MODELAGEM E CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DO GERADOR	41
3.1	Modelagem da máquina de indução	41
3.1.1	<i>Torque desenvolvido pela máquina de indução em variáveis da máquina</i>	46
3.1.2	<i>Potência da máquina de indução</i>	48
3.1.3	<i>Equações da máquina de indução em variáveis de referência arbitrária</i>	48
3.2	Modelagem do controle do Conversor do Lado do Gerador (CLG)	50
3.2.1	<i>Modelagem do sistema dinâmico do gerador de indução</i>	51
3.2.2	<i>Modelo do gerador de indução em coordenadas de campo do rotor</i>	53
3.2.3	<i>Observador de Fluxo</i>	55
3.2.4	<i>Controle vetorial do GIGE em coordenadas campo do rotor</i>	56
3.2.5	<i>Corrente de magnetização e torque de referência do gerador</i>	58
3.2.6	<i>Sistema de controle de corrente do conversor do lado do gerador</i>	59
3.2.7	<i>Projeto de controladores do controle de corrente elétrica do CLG em coordenadas dq</i>	61

4	RESULTADOS	65
4.1	Resultados do sistema de geração eólica para o controle do CLR	66
4.1.1	<i>PLL</i>	66
4.1.2	<i>Sistema de controle de corrente do CLR</i>	67
4.1.3	<i>Sistema de controle da tensão do barramento CC</i>	68
4.2	Resultados do sistema de geração eólica para o controle do CLG	70
4.2.1	<i>Observador de fluxo e o controle vetorial</i>	70
4.2.2	<i>Sistema de controle de corrente do CLG</i>	71
4.3	Potência do sistema de geração eólica	72
4.4	Simulação do sistema de geração eólica proposto com velocidade variável	75
4.4.1	<i>Resultados do sistema de geração eólica com velocidade variável para o controle do CLR</i>	76
4.4.2	<i>Resultados do sistema de geração eólica com velocidade variável para o controle do CLG</i>	77
4.4.3	<i>Potência do sistema de geração eólica com velocidade variável</i>	79
5	CONCLUSÕES	84
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	85
	REFERÊNCIAS	86
	APÊNDICES	88
	APÊNDICE A – PARÂMETROS UTILIZADOS NO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA	88
	APÊNDICE B – SISTEMA DE CONTROLE DO CLR	89
	APÊNDICE C – SISTEMA DE CONTROLE DO CLG	91

1 INTRODUÇÃO

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cataventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água. Para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial, sendo instalada em 1976 a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública, na Dinamarca (ANEEL, 2008).

A geração de energia elétrica a partir da energia eólica, denominada comumente de geração eólica, é importante devido às suas características renovável e limpa em comparação com a energia gerada a partir de combustíveis fósseis. A crescente demanda por energia, a busca por alternativas energéticas ao uso dos combustíveis fósseis e a atenção que se dá às questões ambientais tornam imprescindível o estudo de soluções de geração de energia elétrica com o emprego de fontes alternativas e renováveis. Nesse sentido, das fontes renováveis de energia elétrica existentes destaca-se a energia eólica (MOREIRA, 2017).

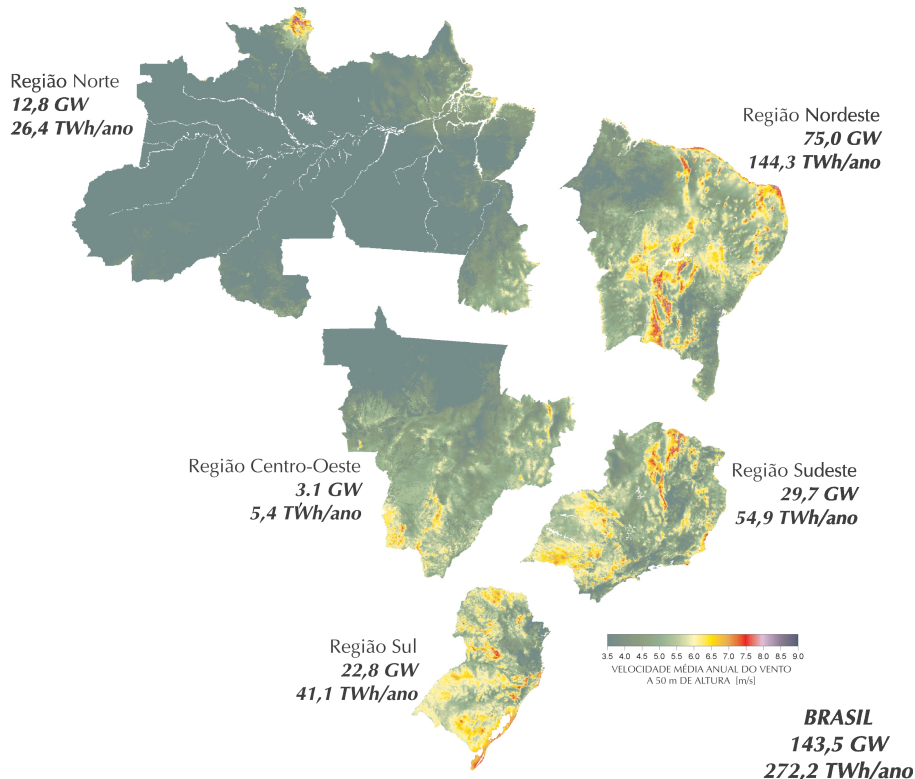
O sistema de geração eólica converte a energia dos ventos em energia mecânica, que passando por um gerador elétrico é convertida em energia elétrica. Desse modo, a produção de eletricidade através desta fonte é uma atividade promissora, devido às suas vantagens e também ao progresso tecnológico alcançado desde a década de 70, permitindo o aumento da eficiência do processo de extração da energia do vento através das turbinas eólicas, dos geradores elétricos e dos conversores eletrônicos de potência (MARTINS, 2017).

Recentemente, a produção de energia eólica brasileira apresentou dados bastante relevantes. Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), de janeiro a setembro de 2017, ocorreu um crescimento de 28% de operação comercial da energia eólica no Sistema Interligado Nacional (SIN) se comparado ao mesmo período do ano de 2016. A geração eólica está em constante crescimento no Brasil, conforme apontam os boletins mensais da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA), em que se observa que em junho de 2014 a participação desta fonte na matriz energética brasileira era de 3% com uma capacidade de geração eólica instalada de 4,6 GW, enquanto em dezembro de 2017, já possuía 12,64 GW de capacidade instalada, distribuídos em 503 usinas, e um total aproximado de 6500 aerogeradores

instalados. Ainda segundo a CCEE, no mês de setembro de 2017, a geração de energia elétrica a partir de usina eólica foi responsável por 11% da geração da matriz energética do país. Esses dados indicam um aumento significativo que evidencia o crescimento da participação da geração eólica na matriz energética nacional (ABEEÓLICA, 2018).

Na Figura 1 apresenta-se o potencial eólico estimado no Brasil, para uma altura de 50 metros. Conforme é mostrado, o potencial eólico brasileiro é da ordem de 143,5 GW e 272,2 TWh/ano. De acordo com a Figura 1, o Nordeste se destaca como sendo a região de maior potencial, o que é muito importante, já que a energia eólica se mostra como um recurso imediato diante o racionamento necessário em tempos de baixo nível nos reservatórios em que prevalece a bandeira vermelha. A importância da geração eólica no Nordeste pode ser comprovada observando que em 2017 (14 de setembro), as usinas eólicas abasteceram 64% da demanda média do Nordeste (ABEEÓLICA, 2018), sendo esse um dado recorde de geração conforme o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (CRESESB, 2002), (MARTINS, 2017).

Figura 1 – Potencial eólico brasileiro a uma altura de 50m



Fonte: (CRESESB, 2002).

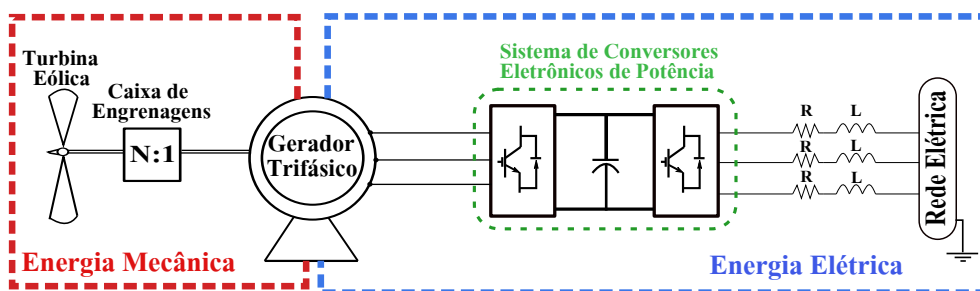
Os sistemas de geração eólica são classificadas quanto ao tipo de operação de

velocidade, operando em velocidade fixa ou variável. Nos sistemas de geração eólica que operam com velocidade fixa, o gerador elétrico é conectado diretamente à rede elétrica. Os sistemas de geração eólica que operam com velocidade variável possuem máxima eficiência de conversão de energia para diferentes velocidades de operação, e o gerador é conectado à rede elétrica através de conversores eletrônicos de potência (REIS, 2013).

Sistemas que operam com a velocidade constante só conseguem extrair a máxima potência da turbina em uma pequena faixa de velocidades do vento, geralmente é escolhida a velocidade mais frequente da região. Já nos sistemas eólicos com velocidade variável, o ganho de energia pode variar de 3 a 28% quando comparados com sistemas de velocidade fixa, dependendo das condições do vento e dos parâmetros da turbina. Dessa forma, com o uso de conversores operando com algoritmos de MPPT (*maximum power point tracking*) que calculam a velocidade ótima do gerador dada uma velocidade do vento, é possível se extrair a máxima potência da turbina em uma faixa maior de velocidades do vento (VOLTOLINI, 2007) (BURTON T.; D. SHARPE, 2001), (MUTSCHLER P.; HOFFINANN, 2002), (BEZERRA, 2010).

Os principais componentes de um sistema de geração eólica que opera em velocidade variável são mostrados na Figura 2, que são a turbina eólica, caixa de engrenagens ou caixa multiplicadora, gerador elétrico e conjunto de conversores eletrônicos de potência, que são divididos em conversor do lado da rede (CLR) e conversor do lado do gerador (CLG), e a rede elétrica quando a ela conectada (CHEN Z.; GUERRERO, 2009), (MARTINS, 2017).

Figura 2 – Componentes de um sistema de geração eólica



Fonte: (MARTINS, 2017).

O gerador elétrico utilizado nos sistemas de geração eólica tem por função converter a potência mecânica proveniente da turbina em potência elétrica, que pode ser enviada a uma rede elétrica de transmissão ou de distribuição de energia elétrica. Geralmente, utilizam-se os conversores eletrônicos de potência nestas aplicações, pois eles permitem transmitir a energia

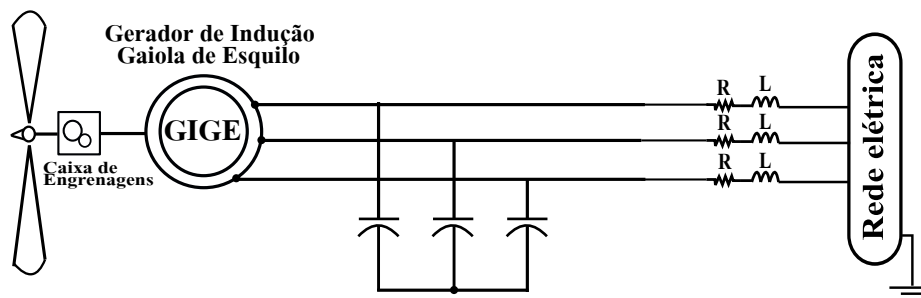
em sistemas de velocidade variável a um sistema de frequência fixa (MARTINS, 2017).

Existem vários tipos de geradores elétricos que são usados em sistemas de geração eólica. Dessa forma, a escolha do tipo de gerador depende da aplicação a ser utilizada (em geração distribuída, parques eólicos, transmissão de energia elétrica). Outros fatores considerados são a potência da máquina e o custo. Os principais tipos de geradores elétricos utilizados no mercado de geração eólica são: gerador de indução gaiola de esquilo (GIGE), gerador de indução rotor bobinado (GIRB), gerador síncrono (GS), gerador síncrono de ímãs permanentes (GSIP) e o gerador de relutância variável (GRV) (MARTINS, 2017).

Nesse trabalho optou-se pela utilização do GIGE devido às suas vantagens, já que ele é considerado robusto, apresenta baixo custo, manutenção simples e não necessita de escovas como as máquinas de indução com rotor bobinado ou síncronas.

Nas primeiras aplicações do GIGE sua operação era restrita a uma velocidade fixa e seus terminais eram conectados diretamente à rede elétrica, através de capacitores em paralelo, como mostrado na Figura 3. Este tipo de topologia, apesar de contar com vantagens como seu baixo custo e manutenção simples, apresenta desvantagens devido à falta de possibilidade de ajustar a frequência e a tensão e ocorrência de flutuação de tensão no ponto de acoplamento comum e grande estresse mecânico (BIM, 2009), (PINTO, 2013).

Figura 3 – Gerador de indução de gaiola de esquilo conectado diretamente à rede elétrica

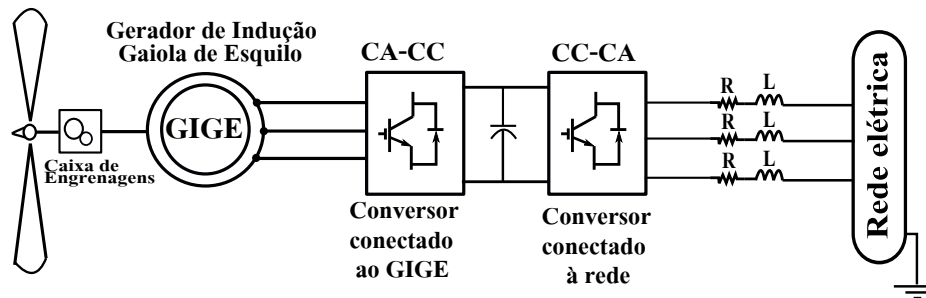


Fonte: (MARTINS, 2017).

Com o uso de conversores eletrônicos de potência, como mostrado na Figura 4, é possível utilizar o GIGE em sistemas de geração eólica que operem em velocidade variável, solucionando os problemas mencionados anteriormente. Esta topologia se destaca pela possibilidade de extrair a máxima potência em várias velocidades de vento. Além disso, através de dois conversores eletrônicos de potência conectados em cascata, *back-to-back*, entre o gerador e a rede elétrica, é possível realizar o controle de potências. O conversor do lado da rede é controlado, de modo que se possa transferir a potência do gerador à rede elétrica, com o auxílio

do controle de tensão do barramento CC, enquanto o controle do conversor do lado do gerador é projetado para captar máxima potência do vento e enviar à rede elétrica, através de técnicas de controle como o controle vetorial (MARTINS, 2017), (BATISTA, 2013), (LIPO, 1996).

Figura 4 – Gerador de indução de gaiola de esquilo conectado à rede elétrica através de filtro L



Fonte: (MARTINS, 2017).

Os conversores eletrônicos de potência utilizados no sistema de geração de energia elétrica a partir da energia eólica operando em velocidade variável são conversores estáticos e chaveados, e a esses conversores se aplicam métodos de controle por modulação em largura de pulsos (*Pulse Width Modulation* ou PWM) e se utilizam dispositivos semicondutores, como o IGBT, que permitem a troca de potência, tanto ativa quanto reativa, bidirecional (SARMENTO, 2013), (MARTINS, 2017).

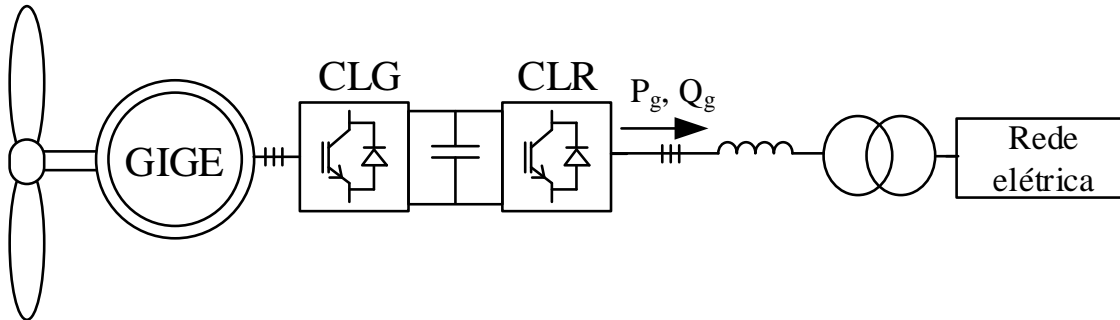
Dessa forma, para a realização desse trabalho, utilizou-se a segunda topologia e uma estratégia de controle para o conversor do lado do gerador utilizando o controle vetorial em função das coordenadas de campo do rotor, de modo que o GIGE é controlado através do torque e da corrente de magnetização. Além disso, são utilizadas as referências de eixo direto e de eixo em quadratura para o sistema de controle de corrente, tanto para o conversor do lado do gerador quanto para o conversor do lado da rede.

A configuração do sistema eólico escolhido para se realizar o estudo deste trabalho é mostrado na Figura 5, em que o sistema eólico é conectado à rede elétrica a partir de um filtro L, e utiliza um gerador de indução gaiola de esquilo (GIGE) para a conversão da energia eólica em elétrica.

Por se tratar de um sistema que opera em velocidade variável, o GIGE é associado a um conversor eletrônico que processa toda a energia gerada pelo gerador. O conversor escolhido para se realizar o controle do gerador e da injeção de energia na rede elétrica foi o

back-to-back. Esse conversor consiste em um retificador trifásico controlado ligado a um inversor trifásico através de um elo CC. O inversor trifásico é conectado à rede e realiza o controle do fluxo de potência que é injetado na rede elétrica.

Figura 5 – Sistema eólico estudado



Fonte: O autor.

1.1 Objetivos

O principal objetivo e contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de geração de energia eólica conectado à rede elétrica a partir de um gerador de indução gaiola de esquilo, de modo que o sistema é controlado pelo controle desenvolvido para os conversores eletrônicos de potência. Dentre outros objetivos do trabalho:

- estudo do modelo matemático dinâmico do gerador de indução gaiola de esquilo;
- estudo do modelo do conversor *back-to-back*;
- estudo de técnicas de controle para os conversores eletrônicos de potência;
- realização de simulação no ambiente Matlab/Simulink/Simpowersystems do sistema de geração de energia eólica conectado à rede elétrica a partir do GIGE;
- verificação e análise do comportamento do sistema de geração eólica no controle de potências a partir de simulação computacional.

1.2 Justificativa

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

A geração de energia elétrica a partir da energia eólica tende a aumentar, já que os ventos possuem um potencial enorme que pode ser captado por sistemas eólicos de geração e

atender a cargas isoladas ou grandes sistemas elétricos de potência (BEZERRA, 2010).

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, a utilização do GIGE tem ganhado cada vez mais força na produção de energia elétrica a partir da energia eólica, já que o GIGE apresenta vantagens quando comparado com outros geradores.

Desse modo, a implementação do sistema proposto, bem como as técnicas de controle utilizadas para o funcionamento do sistema, buscam contribuir para a viabilização do uso da energia proveniente dos ventos para aplicações em sistemas eólicos.

1.3 Metodologia

Foi utilizada neste trabalho a metodologia clássica do desenvolvimento do assunto proposto com a utilização de simulações para a aquisição dos resultados.

As simulações computacionais foram realizadas com o uso do software de simulações matemáticas Matlab/Simulink/Simpowersystems, baseadas no modelo matemático dinâmico do sistema de geração eólica.

1.4 Organização do trabalho

O capítulo 2 tem como objetivo apresentar toda a modelagem do CLR, sendo apresentado o modelo do conversor eletrônico CC-CA trifásico conectado à rede elétrica com filtro indutivo (filtro L), bem como metodologia de projeto dos controladores do CLR, procedimento de conexão com a rede elétrica. Dessa forma, são discutidas as estratégias de controle, detalhando-se o PLL, o controle de tensão do barramento CC e o controle de corrente do CLR, em que foi utilizada a resposta em frequência para a obtenção dos compensadores.

O capítulo 3 tem como objetivo apresentar toda a modelagem, em coordenadas abc e dq, da máquina de indução em gaiola de esquilo. Além disso, aborda-se a modelagem do CLG, sendo discutidas as estratégias de controle, detalhando-se o observador de fluxo, o controle vetorial em coordenadas campo do rotor e o controle de corrente do CLG, em que foi utilizada a resposta em frequência para a obtenção dos compensadores.

O capítulo 4 relata os resultados obtidos usando as estratégias propostas para o sistema de geração eólica com GIGE. A simulação desenvolvida é descrita com detalhes e são discutidos os resultados obtidos. Os resultados são divididos em dois estudos de caso: sistema completo operando em velocidade constante e operando em velocidade variável.

As conclusões sobre a pesquisa realizada são apresentadas no capítulo 5, incluindo as propostas para trabalhos futuros.

As características dos sistemas de geração eólica equipados com GIGE, bem como os valores dos parâmetros utilizados no sistema são apresentados no apêndice A. Os blocos modelados e utilizados no sistema são apresentados no apêndice B.

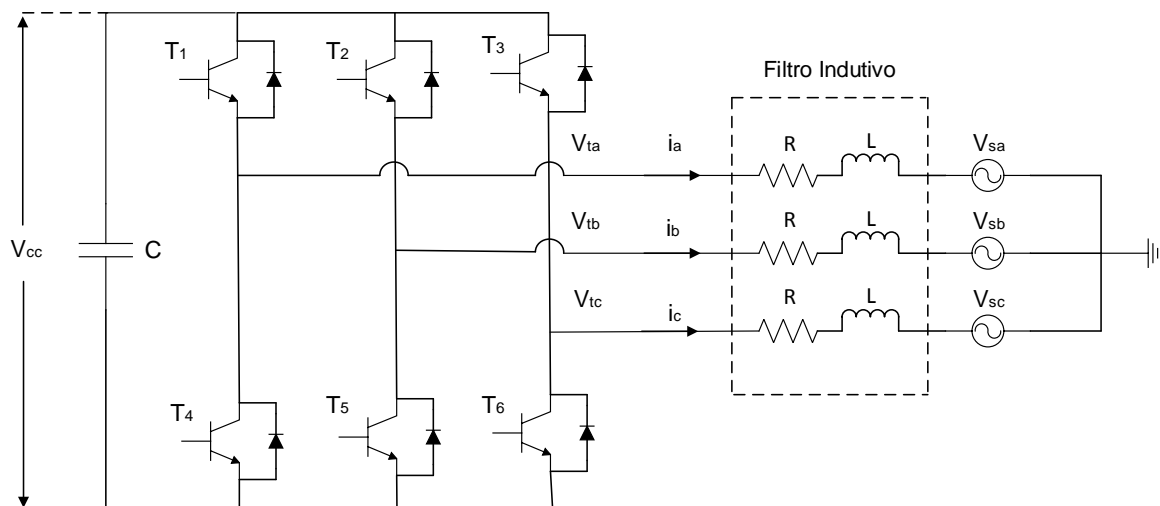
2 MODELAGEM E CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE

Neste capítulo apresentar-se-á a modelagem e o controle do conversor do lado da rede (CLR), o qual é um conversor eletrônico CC-CA trifásico conectado à rede elétrica através de um filtro L. Este conversor tem por função manter a tensão do barramento CC constante, bem como controlar a corrente reativa injetada na rede elétrica. Além disso, a metodologia de controle das correntes do CLR e da tensão do barramento CC é desenvolvida através da teoria dos eixos girantes dq, e o mecanismo de sincronismo com as tensões da rede elétrica também são descritos.

2.1 Modelagem do Conversor do Lado da Rede (CLR)

O conversor eletrônico trifásico conectado a rede elétrica com filtro indutivo é apresentado pela Figura 6, em que V_{sa} , V_{sb} e V_{sc} são as tensões da rede elétrica, L é o indutor utilizado que conecta o conversor eletrônico à rede elétrica, R é a resistência elétrica utilizada, V_{ta} , V_{tb} e V_{tc} são as tensões nos terminais do conversor eletrônico, e V_{cc} é a tensão no capacitor.

Figura 6 – Conversor eletrônico CC-CA trifásico conectado à rede elétrica através de filtro L



Fonte: O autor.

A partir da Figura 6, e da lei das malhas, obtém-se que a equação dinâmica do conversor eletrônico trifásico do lado da rede elétrica, dada pela Equação (2.1).

$$V_{tabc} = R \cdot I_{abc} + L \frac{d}{dt} \cdot I_{abc} + V_{sabc} \quad (2.1)$$

Assim, ao expandir a Equação (2.1), tem-se as Equações (2.2), (2.3) e (2.4).

$$V_{ta} = R \cdot I_a + L \frac{d}{dt} \cdot I_a + V_{sa} \quad (2.2)$$

$$V_{tb} = R \cdot I_b + L \frac{d}{dt} \cdot I_b + V_{sb} \quad (2.3)$$

$$V_{tc} = R \cdot I_c + L \frac{d}{dt} \cdot I_c + V_{sc} \quad (2.4)$$

Como se pode observar, as Equações (2.2), (2.3) e (2.4) estão definidas no sistema trifásico abc . No entanto, o tratamento das equações em um sistema trifásico abc torna o controle mais complexo (por exemplo, o projeto do compensador não seria uma tarefa simples, especialmente se a frequência de operação for variável). Dessa forma, o controle baseado em um sistema de coordenadas de eixo direto e de quadratura (dq) oferece uma solução simples para esse problema, já que os sinais assumem formas de onda constantes sob condições de estado estacionário, o que permite a utilização de compensadores com estruturas mais simples. Além disso, a representação de um sistema trifásico em coordenadas de eixo direto e de quadratura (dq) também é mais adequada para tarefas de projeto de análise e controle (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Dessa maneira, considerando o sistema trifásico equilibrado, as Equações (2.2), (2.3) e (2.4) são representadas em um sistema bifásico ortogonal em eixo direto e de quadratura (dq), que terá uma posição instantânea θ em relação à fase a (BEZERRA, 2010).

Utiliza-se as transformadas direta e inversa de Park para a transformação do sistema de coordenadas abc para dq e dq para abc , respectivamente. Dessa maneira, aplica-se as transformadas de Park nas tensões e correntes presentes na Equação (2.1), de modo que a equação dinâmica do conversor seja dada em coordenadas dq .

As Equações (2.5) e (2.6) ilustram a aplicação das transformadas direta e inversa de Park, respectivamente, nas tensões da rede elétrica V_{sa} , V_{sb} e V_{sc} (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = T_{abc \rightarrow dq} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = T_{dq \rightarrow abc} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Em que, $T_{abc \rightarrow dq}$ e $T_{dq \rightarrow abc}$ são definidas, segundo (YAZDANI; IRAVANI, 2010), como segue nas Equações (2.7) e (2.8).

$$T_{abc \rightarrow dq} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$T_{dq \rightarrow abc} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

É necessário observar que a variação de θ no tempo, é a velocidade angular, conforme a Equação (2.9). Aplicando-se a transformada direta de Park às tensões e correntes da equação (2.1), e aplicando o conceito de velocidade angular (como ilustrado na Equação (2.9)), determina-se a equação dinâmica do conversor em coordenadas dq, mostrada na Equação (2.10).

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega(t) \quad (2.9)$$

$$V_{tdq} = R \cdot I_{dq} + L \frac{d}{dt} \cdot I_{dq} - jL\omega I_{dq} + V_{sdq} \quad (2.10)$$

Em que (2.10) é desagrupada de acordo com a Equação (2.11).

$$V_{tdq} = V_{td} + jV_{tq} \quad (2.11)$$

Ao expandir (2.11) em termo de d e q, tem-se as Equações (2.12) e (2.13) (MOREIRA, 2017).

$$V_{td} = R \cdot I_d + L \frac{d}{dt} \cdot I_d - L\omega I_q + V_{sd} \quad (2.12)$$

$$V_{tq} = R \cdot I_q + L \frac{d}{dt} \cdot I_q + L\omega I_d + V_{sq} \quad (2.13)$$

Isolando os termos das Equações (2.12) e (2.13) em função de $L \frac{d}{dt}$, tem-se (2.14) e (2.15).

$$L \frac{d}{dt} \cdot I_d = V_{td} - R \cdot I_d + L\omega I_q - V_{sd} \quad (2.14)$$

$$L \frac{d}{dt} \cdot I_q = V_{tq} - R \cdot I_q - L\omega I_d - V_{sq} \quad (2.15)$$

2.2 Sistema de controle do Conversor do Lado da Rede (CLR)

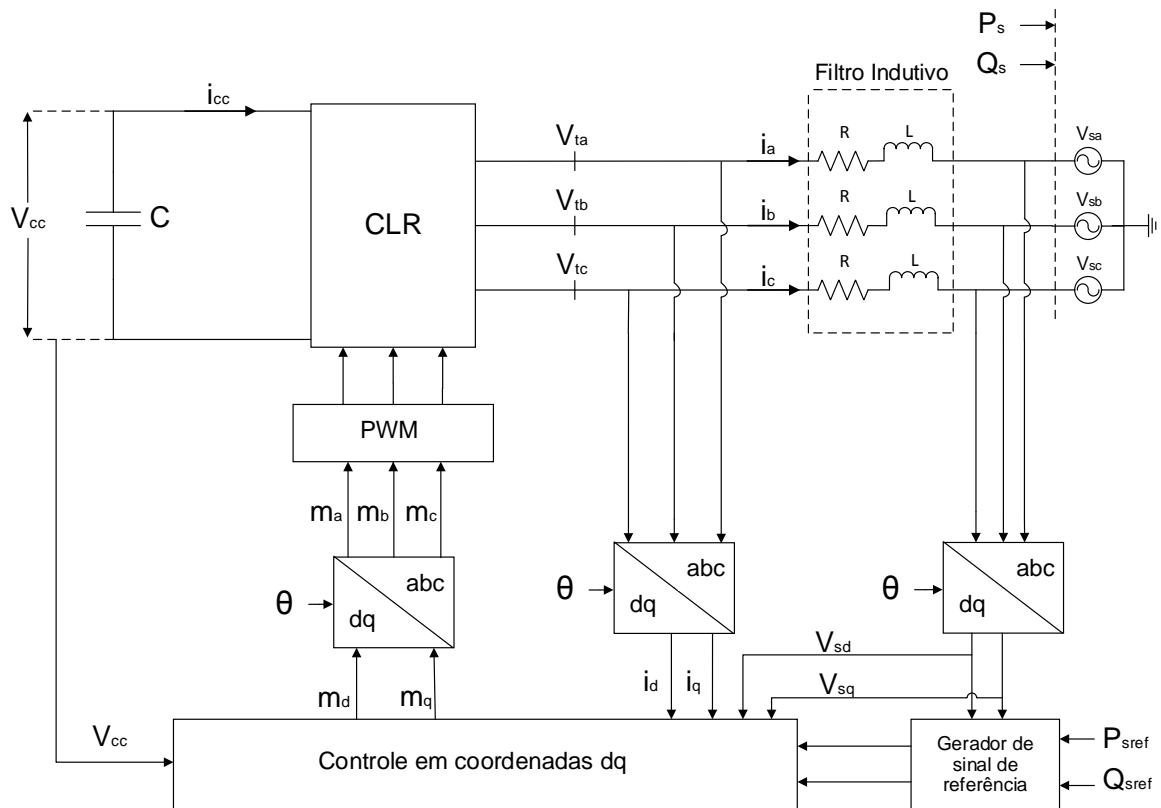
A Figura 7 mostra um diagrama esquemático do conversor do lado da rede com o seu sistema de controle, o qual controla a energia ativa e reativa por corrente em coordenadas dq. Dessa forma, P_s e Q_s são controlados pelos componentes de corrente I_d e I_q . Os sinais de realimentação são transformados para o sistema de coordenadas dq e depois processados pelos compensadores para produzir os sinais de controle em coordenadas dq. Após isso, os sinais de controle são transformados em coordenadas abc (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

O esquemático apresentado na Figura 7 é também denotado por sistema VSC (*Voltage Source Converter*), pois o conversor comporta-se como uma fonte de tensão com frequência imposta pela rede elétrica (MARTINS, 2017).

2.2.1 PLL (*Phase Locked Loop*)

Para que um sistema de geração de energia eólica seja conectado à rede elétrica é necessário que haja sincronismo entre as tensões que são produzidas pelo inversor (conversor do lado da rede elétrica) e as tensões da rede elétrica. Esse sincronismo é realizado utilizando o bloco PLL (*Phase Locked Loop*), que é responsável por regular, ou sincronizar, as tensões produzidas pelo inversor e as tensões da rede elétrica, gerando um ângulo θ , que estará sempre em fase com a tensão da rede elétrica, de forma que este ângulo θ é utilizado na transformação de coordenadas abc para dq (MOREIRA, 2017).

Figura 7 – Esquemático do conversor do lado da rede, que controla a energia ativa e reativa através de corrente em coordenadas dq



Fonte: O autor.

Aplicando-se a transformada de Park às tensões da rede, a fim de se obter as tensões em coordenadas dq, tem-se as tensões da rede descritas nas Equações (2.16) e (2.17).

$$V_{sd} = V_s \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \theta) \quad (2.16)$$

$$V_{sq} = V_s \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \theta) \quad (2.17)$$

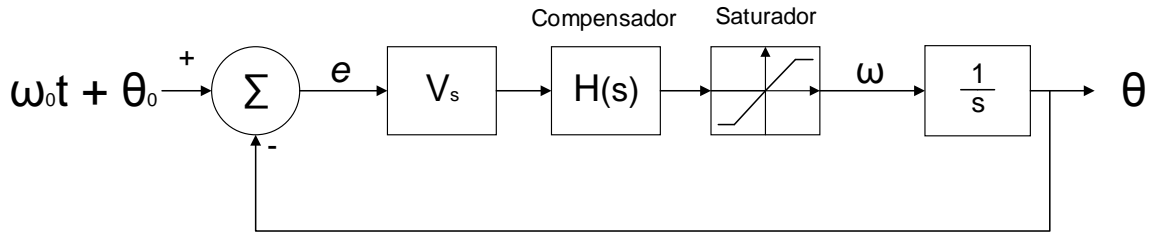
V_s é o valor de pico da tensão de linha, ω_0 é a frequência do sistema de corrente alternada (fonte), θ_0 é o ângulo de fase inicial da fonte e θ é a posição instantânea da coordenada d em relação a fase a .

A partir de (2.17), com $\theta(t) = \omega_0 t + \theta_0$, obtém-se $V_{sq} = 0$. Dessa maneira, tem-se um mecanismo para regular V_{sq} em zero, que é obtido com base na lei de realimentação (feedback), expressa por (2.18) e ilustrada na Figura 8, que representa o diagrama de blocos do controle do

PLL (YAZDANI; IRAVANI, 2010), (MARTINS, 2017).

$$\omega(t) = H(s) \cdot V_{sq}(t) \quad (2.18)$$

Figura 8 – Diagrama de blocos do controle do PLL



Fonte: O autor.

O termo $H(s)$ presente em (2.18) refere-se a uma função de transferência linear, um compensador, e $s = \frac{d(\cdot)}{dt}$. Substituindo $V_{sq} = 0$ de (2.17) em (2.18) e substituindo $\omega(t)$ de (2.9) em (2.18), tem-se (2.19).

$$\frac{d\theta}{dt} = H(s) V_s \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \theta) \quad (2.19)$$

A Equação (2.19) representa um sistema dinâmico não linear, que é o PLL. Por ser um sistema com característica não linear, pode ter desempenho insatisfatório sob algumas condições (por exemplo, quando o intervalo de variações para $\omega(t)$ é grande). A fim de se evitar esse desempenho insatisfatório, (2.18) é reescrita em (2.20) (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

$$\omega(t) = H(s) V_{sq}(t), \text{ onde } \omega(0) = \omega_0 \text{ e } \omega_{min} \leq \omega \leq \omega_{max} \quad (2.20)$$

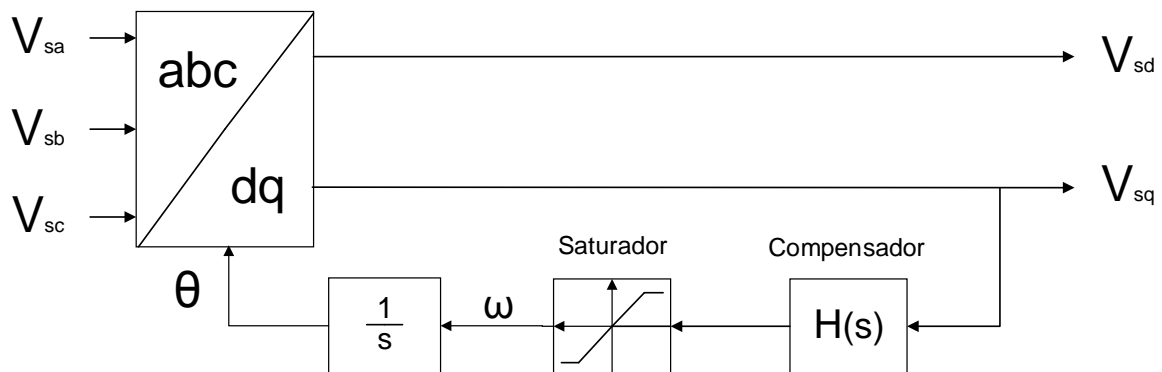
É importante salientar que ω_{min} e ω_{max} são selecionados para estarem próximos de ω_0 e, dessa forma, definir um intervalo estreito de variações para $\omega(t)$. Ao passo que o PLL rastrea $\omega_0 t + \theta_0$ (e assim tem $\theta = \omega_0 t + \theta_0$), o termo $\omega_0 t + \theta_0 - \theta$ aproxima-se de zero e pode-se considerar que $\sin(\omega_0 t + \theta_0 - \theta) \approx \omega_0 t + \theta_0 - \theta$. Logo, a Equação (2.19) é simplificada em (2.21), que descreve um sistema de controle de realimentação clássico, no qual $(\omega_0 t + \theta_0)$

é a entrada de referência, θ é a saída e $V_s H(s)$ é a função de transferência do compensador (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

$$\frac{d\theta}{dt} = V_s H(s)(\omega_0 t + \theta_0 - \theta) \quad (2.21)$$

A Figura 9 retrata o diagrama esquemático do PLL, na qual mostra que o PLL transforma V_{sabc} para V_{sdq} e ajusta a velocidade de rotação (ω) do sistema de coordenadas dq, de maneira que V_{sq} é zero, o que assegura o resultado final de $\theta(t) = \omega_0 t + \theta_0$ e $V_{sd} = V_s$. O integrador da Equação (2.9) é realizado por meio de um oscilador controlado por tensão (VCO), o qual pode ser considerado um integrador reajustável em que a saída, θ , é zerada sempre que atinge o valor de 2π (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Figura 9 – Diagrama esquemático do PLL



Fonte: O autor.

2.2.2 Controle de corrente do CLR

O controle de corrente do CLR contribui ativamente para controlar as potências ativa e reativa entregues ou absorvidas da rede. As potências ativa e reativa são definidas de acordo com (2.22) e (2.23).

$$P_s = \frac{3}{2} [V_{sd} i_d + V_{sq} i_q] \quad (2.22)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} [-V_{sd} i_q + V_{sq} i_d] \quad (2.23)$$

É necessário enfatizar que os termos V_{sd} e V_{sq} são as tensões da rede em coordenadas dq. Além disso, ao passo que o PLL se estabiliza, a tensão $V_{sq} = 0$, e, assim, (2.22) e (2.23) podem ser reescritas como as Equações (2.24) e (2.25) (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

$$P_s = \frac{3}{2} [V_{sd} i_d] \quad (2.24)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} [-V_{sd} i_q] \quad (2.25)$$

Por conseguinte, a partir de (2.24) e (2.25), observa-se que as potências P_s e Q_s podem ser controladas pelas correntes i_d e i_q , respectivamente, obtendo às Equações (2.26) e (2.27).

$$i_{dref} = \frac{2}{3 V_{sd}} P_{sref} \quad (2.26)$$

$$i_{qref} = -\frac{2}{3 V_{sd}} Q_{sref} \quad (2.27)$$

Portanto, a medida que o sistema de controle consegue igualar as variáveis de corrente de acordo com suas referências ($i_{dref} \approx i_d$ e $i_{qref} \approx i_q$), então se obterá $P_{sref} \approx P_s$ e $Q_{sref} \approx Q_s$, já que P_{sref} e Q_{sref} são controladas pelas correntes. Ainda é possível inferir que, desde que V_{sd} seja uma variável contínua, i_{dref} e i_{qref} também serão variáveis contínuas se P_{sref} e Q_{sref} forem sinais constantes (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

O controle em coordenadas dq do controlador de corrente do conversor é baseado em (2.14) e (2.15), de forma que as tensões de eixo direto e de quadratura dos terminais do conversor, V_{td} e V_{tq} , decorrem da tensão do barramento CC, V_{cc} , e dos índices de modulação em coordenadas dq, m_d e m_q , como se verifica nas Equações (2.28) e (2.29) (YAZDANI; IRAVANI, 2010) (MOREIRA, 2017).

$$V_{td} = \frac{V_{cc}}{2} m_d \quad (2.28)$$

$$V_{tq} = \frac{V_{cc}}{2} m_q \quad (2.29)$$

As Equações (2.14) e (2.15) representam o modelo em coordenadas dq do CLR. Nesse modelo, tem-se que i_d e i_q são variáveis de estado, V_{td} e V_{tq} são entradas de controle, e V_{sd} e V_{sq} são entradas de perturbação. Logo, as Equações (2.30) e (2.31) retratam os índices de modulação m_d e m_q .

$$m_d = \frac{2}{V_{cc}} (u_d - L\omega i_q + V_{sd}) \quad (2.30)$$

$$m_q = \frac{2}{V_{cc}} (u_q + L\omega i_d + V_{sq}) \quad (2.31)$$

Os índices de modulação mostrados em (2.30) e (2.31), m_d e m_q , são responsáveis por realizar o desacoplamento das correntes elétricas e por anular o efeito de distúrbios. Além disso, os termos u_d e u_q presentes nessas equações são as novas entradas do sistema, ou seja, são duas novas entradas de controle, e ω é a frequência da rede elétrica em radianos por segundo (MOREIRA, 2017).

Substituindo m_d e m_q de (2.30) e (2.31) em (2.28) e (2.29), respectivamente, e substituindo V_{td} e V_{tq} em (2.14) e (2.15), obtém-se (2.32) e (2.33).

$$L \frac{d}{dt} I_d = -R I_d + u_d \quad (2.32)$$

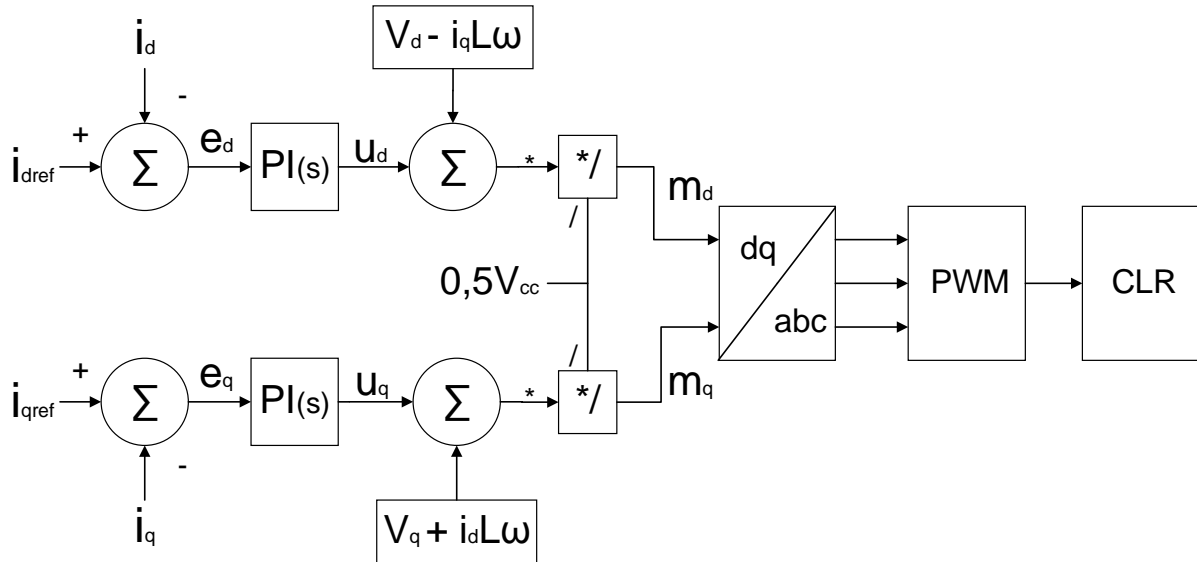
$$L \frac{d}{dt} I_q = -R I_q + u_q \quad (2.33)$$

As Equações (2.32) e (2.33) representam dois sistemas lineares desacoplados de primeira ordem. Assim, com base em (2.32) e (2.33), depreende-se que i_d e i_q podem ser controlados por u_d e u_q , respectivamente.

A Figura 10 mostra uma representação em bloco dos controladores de corrente do eixo direto e de quadratura do sistema CLR, em que u_d e u_q são as saídas de dois compensadores correspondentes. O compensador do eixo direto processa $e_d = i_{dref} - i_d$ e fornece u_d , o que mostra que u_d contribui para m_d , como mostra (2.30). Da mesma forma, o compensador do eixo de quadratura processa $e_q = i_{qref} - i_q$ e fornece u_q , que contribui para m_q , como mostra (2.31). É importante ainda enfatizar que no sistema de controle da Figura 10, todos os sinais de controle,

feed-forward e realimentação, são grandezas CC no estado estacionário (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Figura 10 – Sistema de controle de corrente do conversor do lado da rede



Fonte: O autor.

2.2.3 Controle de tensão do barramento CC

O controle do conversor do lado da rede elétrica depende do controle das correntes, e de acordo com a Figura 10, o controle das correntes, em coordenadas de eixo direto e de quadratura, depende das correntes de referência i_{dref} e i_{qref} . Tais correntes, como observado em (2.26) e (2.27), dependem da potência ativa e reativa, P_{sref} e Q_{sref} , respectivamente.

Assim, o controle da tensão do barramento CC é agregado ao controle do conversor do lado da rede, e seu principal objetivo é controlar a tensão do barramento CC, a proporção que sua operação acompanhe uma referência pré determinada.

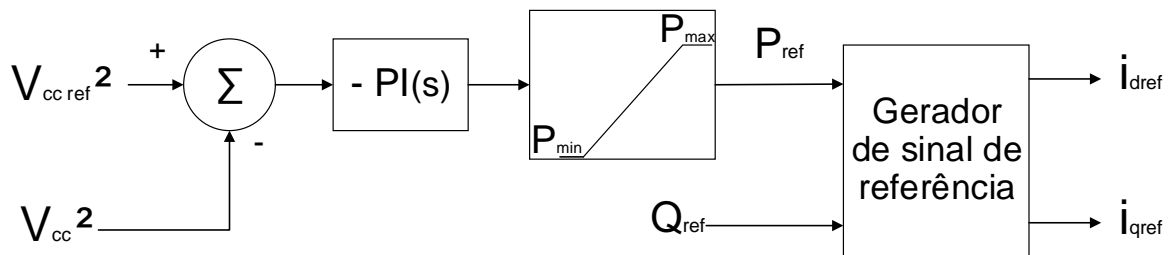
A fim de regular a tensão do barramento CC, utiliza-se um mecanismo de realimentação que compara o quadrado da tensão medida no barramento CC, V_{cc} , com o quadrado do sinal de tensão de referência pré determinada, V_{ccref} , e assim gera um sinal de erro, que passará por um compensador (que pode ser um simples PI), e resultará na potência ativa de referência P_{sref} , a qual, juntamente com a potência reativa de referência Q_{sref} , passará por um gerador de sinal de referência que gera as correntes de referência de eixo direto e de quadratura i_{dref} e i_{qref} , respectivamente (MARTINS, 2017).

É importante enfatizar que a potência reativa de referência é controlada de forma

independente, ou seja, o seu valor de referência é pré determinado. Assim sendo, regula-se, nesse projeto, a potência reativa em zero VAR. Ou seja, parte-se do princípio que o fator de potência é unitário.

A Figura 11 mostra o diagrama esquemático do controle de tensão do barramento CC para possibilitar a obtenção das correntes de referência em coordenadas dq, i_{dref} e i_{qref} . Torna-se fundamental perceber que a potência ativa da rede elétrica trocada com o sistema CLR seja mantida em zero, de modo que a tensão do barramento CC seja igual a tensão de referência pré determinada, o que garantirá que a tensão do barramento CC seguirá a referência pré determinada. Contudo, deve-se salientar que a potência ativa se tornará negativa quando a tensão aumentar na pré carga, o que evidenciará que o barramento CC estará consumindo energia oriunda da rede elétrica (MARTINS, 2017).

Figura 11 – Diagrama de blocos do controle da tensão do barramento CC



Fonte: O autor.

O conversor do lado da rede elétrica, que tem por função regular a tensão do barramento CC, possui dois modos de operação: modo retificador e modo inversor. Quando a tensão do barramento CC é reduzida, o conversor do lado da rede opera no modo retificador, a fim de carregar o capacitor para regular a tensão do barramento CC. Quando há energia do vento, a tensão do barramento CC aumenta e o conversor do lado da rede opera no modo inversor, fornecendo a energia do barramento CC para a rede elétrica, a fim de regular a tensão do barramento CC (SUEBKINORN W. ; NEAMMANEE, 2011).

2.3 Projeto dos controladores

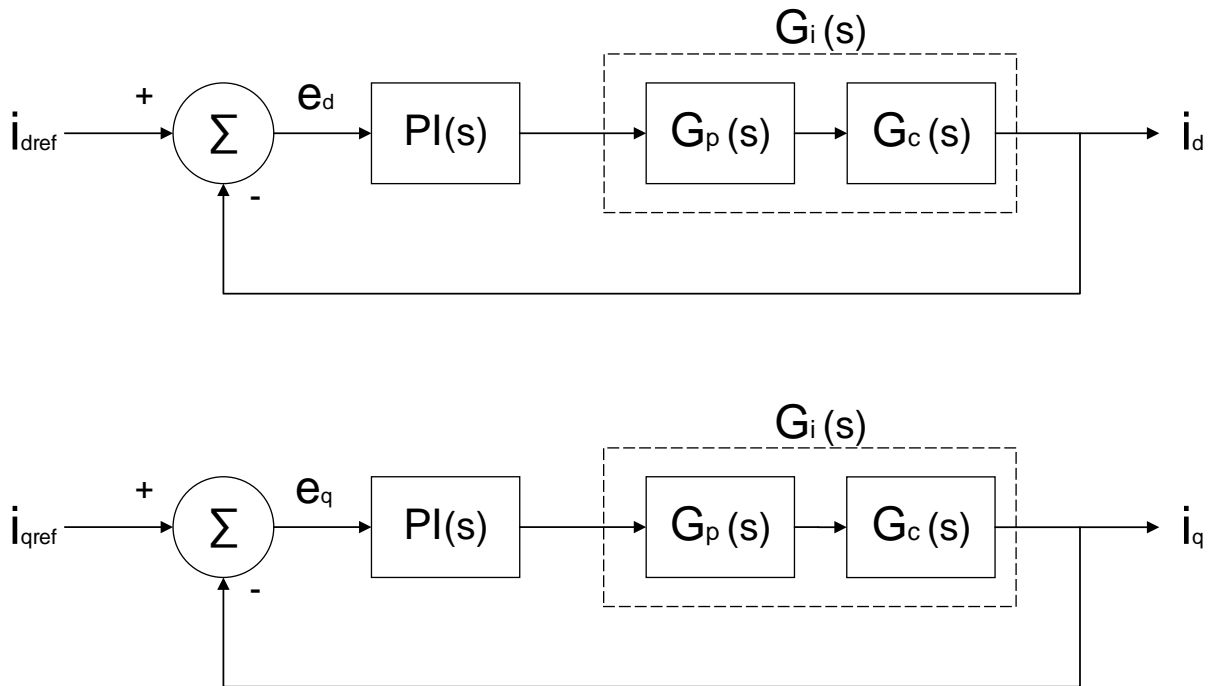
O projeto e dimensionamento dos controladores faz-se necessário para se obter estabilidade no sistema. Assim, será apresentado nesta seção o projeto dos controladores do controle de corrente, do controle de tensão e do PLL, assim como a resposta em frequência de cada um deles.

O projeto dos controladores se baseia na resposta em frequência, de modo que um bom projeto de controlador apresenta margem de ganho (MG) maior que 6 dB e margem de fase (MF) entre 30° e 60° (MOREIRA, 2017), (OGATA, 2011).

2.3.1 Projeto de controladores do controle de corrente do CLR em coordenadas dq

A Figura 10 mostra uma representação em bloco dos controladores de corrente do eixo direto e de quadratura do conversor do lado da rede elétrica. Essa representação em blocos da Figura 10 pode ser simplificada, sendo mostrada na Figura 12.

Figura 12 – Diagramas de blocos simplificados dos controladores de corrente elétrica do CLR com filtro L em coordenadas dq



Fonte: O autor.

Como se observa na Figura 12, o sistema de controle simplificado do controlador de corrente do CLR é formado por três blocos: $PI(s)$, $G_p(s)$ e $G_c(s)$. O bloco $PI(s)$ é um controlador PI. O bloco $G_p(s)$ caracteriza a dinâmica do PWM do CLR. Já o bloco $G_c(s)$ é a planta do conversor eletrônico de tensão trifásico do lado da rede elétrica com filtro L. $G_i(s)$ é o produto dos blocos $G_p(s)$ e $G_c(s)$ em cascata.

Tem-se que as funções de transferência da dinâmica do PWM e do conversor eletrônico trifásico conectado com filtro L são dadas por $G_p(s)$ e $G_c(s)$, respectivamente, de acordo com (2.34) e (2.35), em que T_s é o tempo de amostragem, definido como o inverso da frequência

utilizada no PWM, L é a indutância do filtro que conecta à rede ao conversor eletrônico trifásico, e R é a resistência elétrica presente no indutor.

$$G_p(s) = \frac{1 - s(\frac{T_s}{4})}{1 + s(\frac{T_s}{4})} \quad (2.34)$$

$$G_c(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (2.35)$$

Assim, a função de transferência do controlador PI é dada por (2.36).

$$PI(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (2.36)$$

Dessa forma, ao se considerar $s = j\omega$ e substituí-lo em (2.36), tem-se as Equações (2.37) e (2.38).

$$PI(j\omega) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i j\omega} \right) \quad (2.37)$$

$$\angle PI(j\omega) = -\arctan \frac{1}{T_i \omega} \quad (2.38)$$

A margem de fase desejada, MF_d , é calculada a partir de (2.39), em que ω_c é a frequência de cruzamento de ganho.

$$MF_d = \pi + \angle G_i(j\omega_c) + \angle PI(j\omega_c) \quad (2.39)$$

Isto posto, a Equação (2.40) é obtida ao aplicar (2.38) em (2.39) e ao isolar T_i , resultando na primeira condição do projeto do controlador.

$$T_i = \frac{1}{\omega_c \cdot \tan(\pi + \angle G_i(j\omega_c) - MF_d)} \quad (2.40)$$

Sabendo-se que a magnitude da função de transferência de malha aberta de um sistema controlado é a unidade na frequência de cruzamento, obtém-se (2.41). Substituindo

(2.37) em (2.41) e isolando k_p , obtém-se a Equação (2.42), como a segunda condição do projeto do controlador (MOREIRA, 2017).

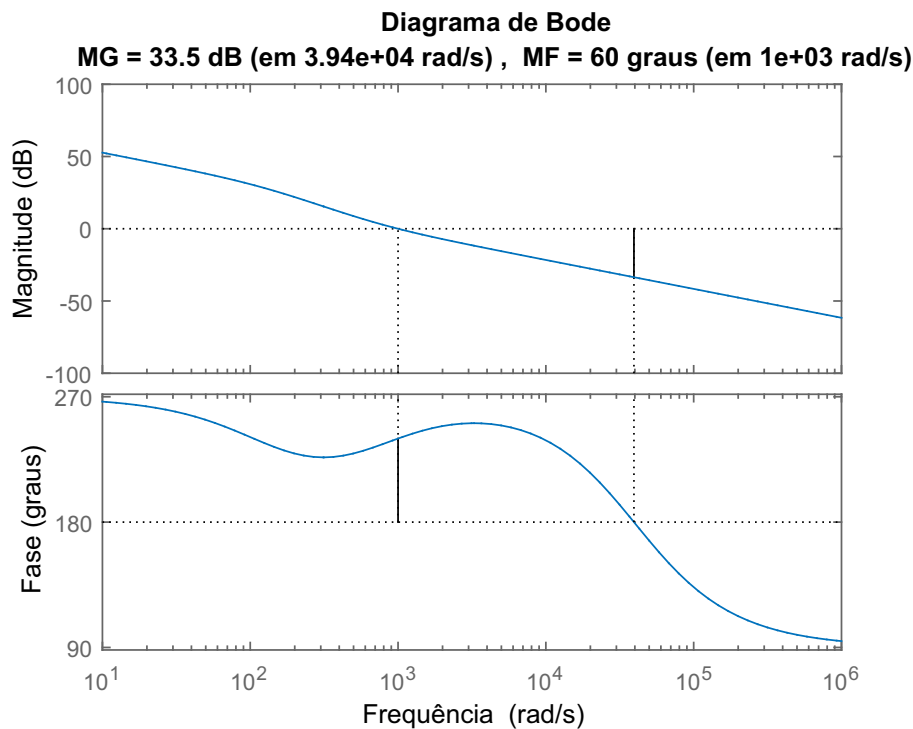
$$|PI(j\omega_c)| \cdot |G_i(j\omega_c)| = 1 \quad (2.41)$$

$$k_p = \frac{1}{|G_i(j\omega_c)| \cdot \left|1 - \frac{j}{\omega_c T_i}\right|} \quad (2.42)$$

A partir das Equações (2.42) e (2.40), e de $\omega_c = 1000 \text{ rad/s}$ e $MF = 60^\circ$, adotados, obteve-se $k_p = 4,9747$ e $T_i = 0,0014$ para o controlador de corrente do CLR. Além disso, é importante ressaltar que o valor da frequência de cruzamento utilizado nesse controlador foi escolhido a partir dos resultados obtidos em simulações.

A Figura 13 mostra a resposta em frequência do sistema controlado pelo controlador de corrente elétrica do CLR. Na figura 13, observa-se que as condições necessárias são seguidas, já que a margem de ganho é maior que 6 dB e a margem de fase é de 60° para a frequência de cruzamento de 1000 rad/s .

Figura 13 – Resposta em frequência de malha aberta do controle das correntes elétricas i_d e i_q do CLR



Fonte: O autor.

2.3.2 Projeto de controladores do controle de tensão do CLR

O controle do barramento CC é responsável por manter a tensão no barramento CC estável. Deste modo, torna-se necessário saber que a tensão no barramento CC é controlada a partir do fluxo de potência entre o CLR e a rede elétrica. Assim, para o CLR e uma fonte de energia no barramento CC, o balanço de energia é dado por (2.43), em que $P_{cc} = V_{cc} i_{cc}$, P_{exto} é a potência ativa processada pelo conversor, $P_{perdas} = V_{cc} i_{perdas}$, e o último termo é referente a taxa de variação da energia armazenada no capacitor do barramento CC. Além disso, tem-se que $P_t = P_{cc}$ é a potência nos terminais do conversor, bem como a entrada de controle, P_{exto} e P_{perdas} são as perturbações de entrada, e V_{cc}^2 é a variável de estado do sistema (MARTINS, 2017).

$$P_{cc} = P_{exto} - P_{perdas} - \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C V_{cc}^2 \right) \quad (2.43)$$

O modelo dinâmico da tensão do barramento CC é dado pela Equação (2.44). Dessa forma, ao desenvolver (2.44) obtém-se a função de transferência (G_{vcc}) da dinâmica do V_{cc} do barramento CC, que é dada por (2.45), em que C é a capacitância do barramento CC e τ é descrito em (2.46).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C V_{cc}^2 \right) = P_{exto} - P_{perdas} - P_t \quad (2.44)$$

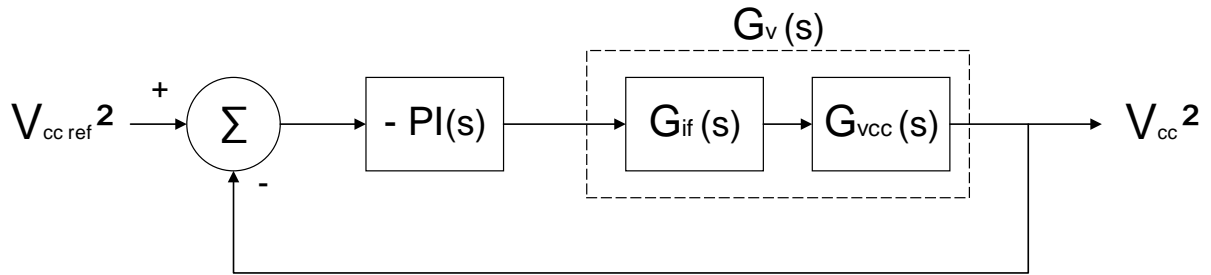
$$G_{vcc}(s) = \frac{V_{cc}^2(s)}{P_t(s)} = - \left(\frac{2}{C} \right) \frac{\tau s + 1}{s} \quad (2.45)$$

$$\tau = \frac{2L P_{exto}}{3V_{sd}^2} \quad (2.46)$$

A Figura 11 mostra uma representação em bloco do controle da tensão do barramento CC. Essa representação em blocos da Figura 11 pode ser simplificada, sendo representada na figura 14.

Como se observa na Figura 14, o sistema de controle simplificado do controlador da tensão do barramento CC é formado por três blocos: $PI(s)$, $G_{if}(s)$ e $G_{vcc}(s)$. O bloco $PI(s)$ é um controlador PI, o bloco $G_{if}(s)$ é a malha fechada do controle de corrente elétrica do conversor do lado da rede, já o bloco $G_{vcc}(s)$ caracteriza a dinâmica de tensão elétrica do barramento CC.

Figura 14 – Diagrama de blocos simplificado do controle de tensão elétrica do barramento CC



Fonte: O autor.

O sinal do controlador PI é multiplicado por -1 para compensar o sinal negativo de $G_{vcc}(s)$. Além disso, na Figura 14, $G_v(s)$ é o produto dos blocos $G_{if}(s)$ e $G_{vcc}(s)$ em cascata.

Aplicando a metodologia de projeto dos controladores PI descrita em 2.3.1 e utilizando a malha aberta da Figura 14, determina-se os parâmetros do controlador PI do controle de tensão do barramento CC a partir de (2.47) e (2.48) (MOREIRA, 2017).

$$T_i = \frac{1}{\omega_c \cdot \tan(\pi + \angle G_v(j\omega_c) - MF_d)} \quad (2.47)$$

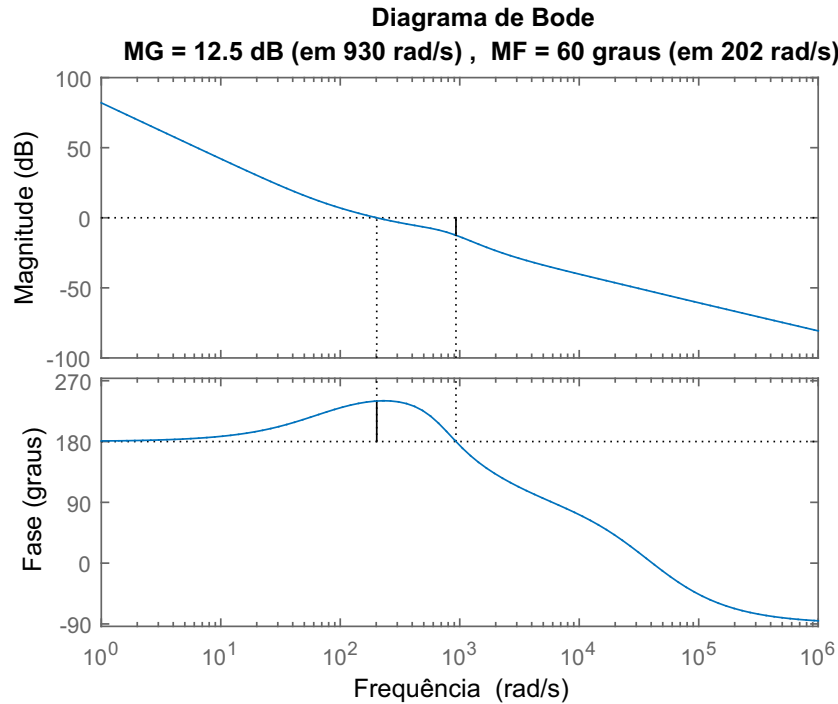
$$k_p = \frac{1}{|G_v(j\omega_c)| \cdot \left| 1 - \frac{j}{\omega_c T_i} \right|} \quad (2.48)$$

A partir de (2.47) e (2.48), e de $\omega_c = 202 \text{ rad/s}$ e $MF = 60^\circ$, adotados, obteve-se $k_p = 0,3143$ e $T_i = 0,0143$ para o controlador de tensão do CLR. Além disso, é importante ressaltar que o valor da frequência de cruzamento utilizado nesse controlador foi escolhido sabendo que a malha de controle de tensão é mais lenta que a malha de controle de corrente, e a partir dos resultados obtidos em simulações.

Adquiriu-se a resposta em frequência do controlador projetado com a ajuda do software *MATLAB*. A Figura 15 mostra a resposta em frequência do sistema controlado pelo controlador de tensão do barramento CC.

Na Figura 15, observa-se que as condições necessárias são seguidas, já que a margem de ganho é maior que 6 dB e a margem de fase é de 60° para a frequência de cruzamento de 202 rad/s .

Figura 15 – Resposta em frequência de malha aberta do controlador de tensão elétrica do barramento CC do CLR



Fonte: O autor.

2.3.3 Projeto do controlador do controle do PLL (Phase Locked Loop)

O principal objetivo do PLL é manter o sincronismo das tensões que saem do conversor com as tensões da rede elétrica, para isso é necessário obter o ângulo da rede elétrica, $\theta(t) = \omega_0 t + \theta_0$, como mostra a Figura 8. Dessa forma, aplica-se a transformada de Park, e obtém-se (2.16) e (2.17), dessa forma o ângulo θ do PLL é variado e tende ao ângulo da tensão elétrica da rede elétrica ($\omega_0 t + \theta_0$), o que faz com que V_{sq} da Equação (2.17) tenda a zero e o PLL esteja sincronizado (MOREIRA, 2017).

A planta utilizada para a sintonia do PLL é mostrada na Figura 8, de modo que é dada pelo integrador multiplicado pela tensão V_{sd} , conforme a Equação (2.49).

Nas Figuras 8 e 9, tem-se que o controlador $H(s)$ é um PI que faz parte do algoritmo do PLL. O controlador $H(s)$ é projetado utilizando o método de resposta em frequência com frequência de cruzamento e a margem de fase, respectivamente, $\omega_c = 195 \text{ rad/s}$ e $MF = 60^\circ$, obtendo-se $k_p = 0,5428$ e $T_i = 0,0089$.

$$G_{PLL}(s) = \frac{1}{s} \quad (2.49)$$

3 MODELAGEM DA MÁQUINA E MODELAGEM E CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DO GERADOR

Neste capítulo será apresentada a modelagem matemática do sistema dinâmico da máquina de indução, desenvolvendo-se as equações dinâmicas do Gerador de Indução em Gaiola de Esquilo (GIGE). Será mostrado ainda o circuito equivalente da máquina de indução em referência de eixo direto e quadratura, as equações de potência e o torque da máquina de indução. A máquina utilizada nesse trabalho é uma máquina de indução gaiola de esquilo, trifásica, simétrica e com ligação em estrela.

Além disso, será ilustrado o controle do conversor do lado do GIGE (CLG), o qual é um conversor eletrônico CA-CC trifásico que é conectado ao barramento CC. A metodologia de controle utilizada no conversor do lado do gerador, a qual é realizada através da teoria dos eixos girantes dq, a sua modelagem matemática dinâmica, o desenvolvimento de projeto para o observador de fluxo, controle vetorial, o sistema de controle de corrente para o conversor do lado do gerador também são descritos.

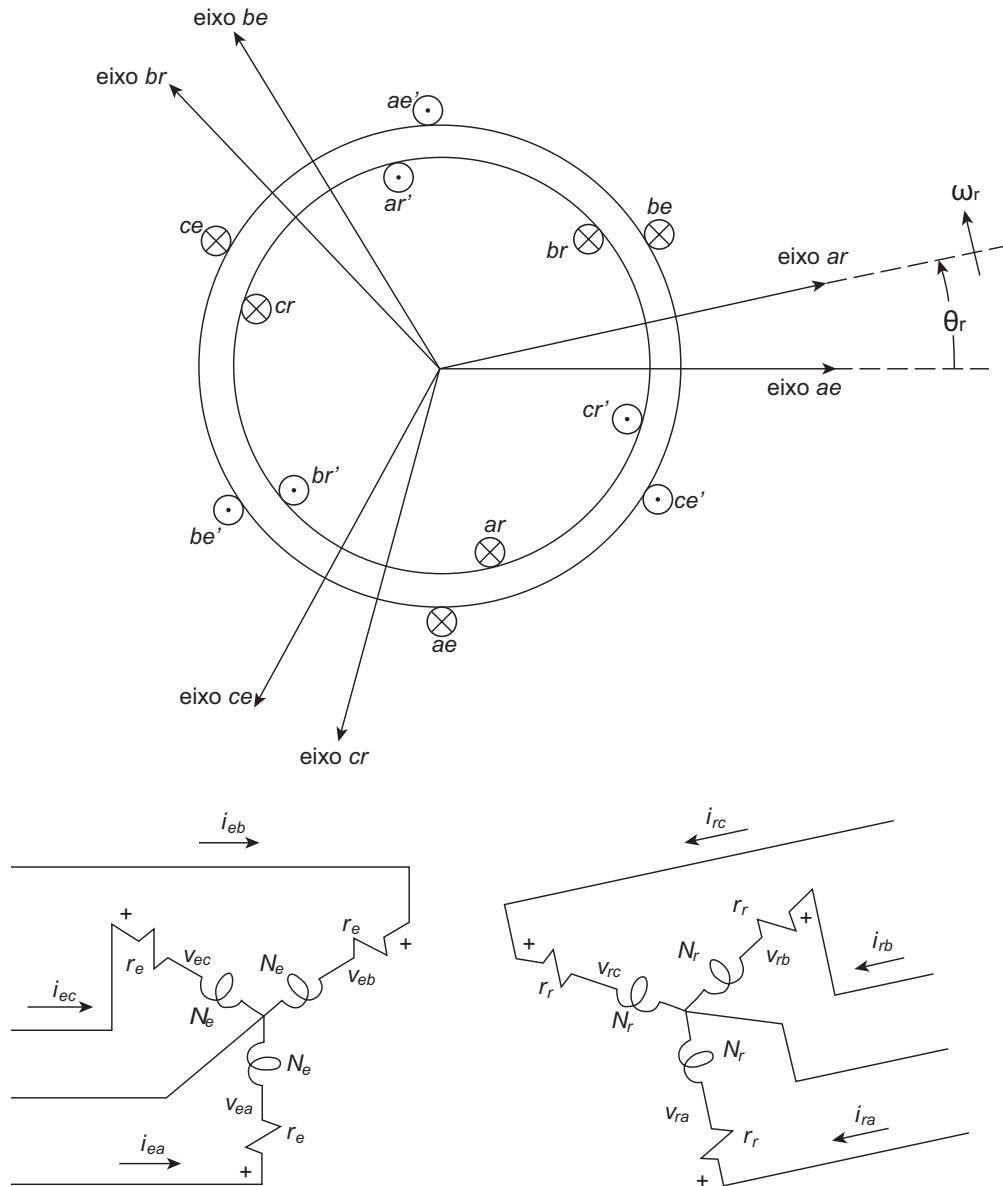
3.1 Modelagem da máquina de indução

As máquinas de indução são usadas em uma ampla variedade de aplicações como um dispositivo de conversão de energia elétrica em trabalho mecânico e vice-versa. Esse uso amplo se deve por serem mais baratas, mais robustas e menores quando comparadas às contínuas e síncronas de mesma potência (BIM, 2009).

A modelagem realizada considera que os enrolamentos do estator são formados por bobinas idênticas, senoidalmente distribuídas, deslocadas de 120° , com N_e espiras equivalentes e resistência r_e . Além disso, os enrolamentos do rotor também serão considerados como três enrolamentos senoidalmente distribuídos e idênticos, deslocados de 120° , com N_r espiras equivalentes e resistência r_r . O arranjo de enrolamento para uma máquina de indução simétrica de dois polos, trifásica, conectada em estrela, é ilustrado na Figura 16 (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013).

As equações de tensão em variáveis da máquina são expressas de forma geral em (3.1) e (3.2), em que o "e" subscripto significa que a variável está associada ao circuito do estator, e o "r" subscripto significa que a variável está associada ao circuito do rotor. Além disso, algumas equações serão expressas de uma forma geral como matrizes, como representadas em (3.3) e (3.4), em que a denotação (T) corresponde à transposta.

Figura 16 – Máquina de indução simétrica bipolar, trifásica e em estrela



Fonte: (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013).

$$V_{eabc} = r_e i_{eabc} + \phi \lambda_{eabc} \quad (3.1)$$

$$V_{rabc} = r_r i_{rabc} + \phi \lambda_{rabc} \quad (3.2)$$

$$(f_{eabc})^T = [f_{ea} \quad f_{eb} \quad f_{ec}] \quad (3.3)$$

$$(f_{rabc})^T = \begin{bmatrix} f_{ra} & f_{rb} & f_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Ao desmembrar as Equações (3.1) e (3.2) obtém-se (3.5), (3.6), (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), de forma que V_{ea} , V_{eb} e V_{ec} são as tensões trifásicas do estator, V_{ra} , V_{rb} e V_{rc} são as tensões trifásicas do rotor, i_{ea} , i_{eb} e i_{ec} são as correntes trifásicas do estator, i_{ra} , i_{rb} e i_{rc} são as correntes trifásicas do rotor, λ_{ea} , λ_{eb} e λ_{ec} são os fluxos concatenados do estator, λ_{ra} , λ_{rb} e λ_{rc} são os fluxos concatenados do rotor, r_e é a resistência elétrica do estator, r_r é a resistência elétrica do rotor, e $\phi = \frac{d}{dt}$.

$$V_{ea} = r_e i_{ea} + \phi \lambda_{ea} \quad (3.5)$$

$$V_{eb} = r_e i_{eb} + \phi \lambda_{eb} \quad (3.6)$$

$$V_{ec} = r_e i_{ec} + \phi \lambda_{ec} \quad (3.7)$$

$$V_{ra} = r_r i_{ra} + \phi \lambda_{ra} \quad (3.8)$$

$$V_{rb} = r_r i_{rb} + \phi \lambda_{rb} \quad (3.9)$$

$$V_{rc} = r_r i_{rc} + \phi \lambda_{rc} \quad (3.10)$$

Para um sistema magneticamente linear, em que $\lambda = Li$, o fluxo concatenado, segundo (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013), pode ser expresso de acordo com a Equação (3.11), na qual L_e é a matriz de indutância do estator, L_r é a matriz de indutância do rotor e L_{er} é a matriz de indutância mútua entre estator e rotor.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{eabc} \\ \lambda_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_e & L_{er} \\ (L_{er})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{eabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

As matrizes das indutâncias do estator, do rotor, e da indutância mútua entre o estator e o rotor podem ser definidas, negligenciando a dispersão mútua entre os enrolamentos do estator e também entre os enrolamentos do rotor, de acordo com (3.12), (3.13) e (3.14), em que L_{le} e L_{me} são, respectivamente, as indutâncias de dispersão e magnetização dos enrolamentos do estator, L_{lr} e L_{mr} são, respectivamente, as indutâncias de dispersão e magnetização dos enrolamentos do rotor, e L_{er} é a amplitude das indutâncias mútuas entre os enrolamentos do estator e do rotor.

$$L_e = \begin{bmatrix} L_{le} + L_{me} & -\frac{1}{2}L_{me} & -\frac{1}{2}L_{me} \\ -\frac{1}{2}L_{me} & L_{le} + L_{me} & -\frac{1}{2}L_{me} \\ -\frac{1}{2}L_{me} & -\frac{1}{2}L_{me} & L_{le} + L_{me} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$L_{er} = L_{re} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Geralmente, em máquinas de indução, é conveniente referir todas as variáveis do rotor para o lado do enrolamento do estator pela relação de transformação, isto é, a relação do número de espiras equivalentes do estator pelo número de espiras equivalentes do rotor. Desse modo, (3.15), (3.16), (3.17) e (3.18) representam as equações do rotor em função do estator (SLEMON, 1992), (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013).

$$V'_{rabc} = \frac{N_e}{N_r} V_{rabc} \quad (3.15)$$

$$i'_{rabc} = \frac{N_r}{N_e} i_{rabc} \quad (3.16)$$

$$\lambda'_{rabc} = \frac{N_e}{N_r} \lambda_{rabc} \quad (3.17)$$

$$Z'_{rabc} = \left(\frac{N_e}{N_r}\right)^2 Z_{rabc} \quad (3.18)$$

As indutâncias de magnetização e mútua estão associadas ao mesmo caminho de fluxo magnético. Portanto, L_{me} , L_{mr} e L_{er} estão relacionados como estabelecido pela Equação (3.19). Substituindo (3.14) em (3.19), obtém-se a Equação mútua em (3.20).

$$L_{me} = \frac{N_e}{N_r} L_{er} \quad (3.19)$$

$$L'_{er} = \frac{N_e}{N_r} L_{er} = L_{me} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

A equação da indutância de magnetização do rotor e a indutância do rotor referida para o lado do enrolamento do estator são definidas, respectivamente, de acordo com (3.21) e (3.22). Substituindo (3.21) e (3.22) em (3.13), obtém-se (3.23), em que L'_{lr} é definido na Equação (3.24).

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_e}\right)^2 L_{me} \quad (3.21)$$

$$L'_r = \left(\frac{N_e}{N_r}\right)^2 L_r \quad (3.22)$$

$$L'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{me} & -\frac{1}{2}L_{me} & -\frac{1}{2}L_{me} \\ -\frac{1}{2}L_{me} & L'_{lr} + L_{me} & -\frac{1}{2}L_{me} \\ -\frac{1}{2}L_{me} & -\frac{1}{2}L_{me} & L'_{lr} + L_{me} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_e}{N_r}\right)^2 L_{lr} \quad (3.24)$$

A partir das Equações (3.16) à (3.24) obtém-se a Equação (3.25), que define o fluxo concatenado com todas as variáveis do rotor para o enrolamento do estator.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{eabc} \\ \lambda'_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_e & L'_{er} \\ (L'_{er})^T & L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{eabc} \\ i'_{rabc} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

As equações das tensões refletindo todas as variáveis do rotor para o lado do enrolamento do estator são definidas, segundo (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013), como mostrado em (3.26). Já (3.27) define r_r para as variáveis do estator.

$$\begin{bmatrix} V_{eabc} \\ V'_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_e + \phi L_e & \phi L'_{er} \\ \phi (L'_{er})^T & r'_r + \phi L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{eabc} \\ i'_{rabc} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$r'_r = \left(\frac{N_e}{N_r}\right)^2 r_r \quad (3.27)$$

3.1.1 Torque desenvolvido pela máquina de indução em variáveis da máquina

A energia armazenada no campo de acoplamento pode ser escrita de acordo com a Equação (3.28), assumindo que máquina é magneticamente linear (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013).

$$W_f = \frac{1}{2}(i_{eabc})^T L_e i_{eabc} + (i_{eabc})^T L'_{er} i'_{rabc} + \frac{1}{2}(i'_{rabc})^T L'_r i'_{rabc} \quad (3.28)$$

A variação de energia mecânica em um sistema rotacional com uma entrada mecânica pode ser descrita de acordo com a Equação (3.29), de forma que é estabelecida a relação entre energia mecânica, torque eletromagnético e o deslocamento angular do rotor. É importante ressaltar que em (3.29), W_m , T_e e θ_{mr} correspondem, respectivamente, a energia mecânica da máquina de indução, ao torque eletromagnético e ao deslocamento angular atual (mecânico) do rotor (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013), (FITZGERALD A. E.; KINGSLEY, 2006).

$$dW_m = -T_e d\theta_{mr} \quad (3.29)$$

O fluxo concatenado, as correntes e W_f podem ser expressos em função do deslocamento angular elétrico do rotor θ_r . A Equação (3.30) mostra a relação entre o deslocamento

angular elétrico do rotor θ_r , e o deslocamento atual do rotor θ_{mr} , em que P corresponde ao número de polos do gerador de indução.

$$\theta_r = \frac{P}{2} \theta_{mr} \quad (3.30)$$

A partir da Equação (3.30), obtém-se o valor de θ_{mr} em função de θ_r , e substituindo (3.30) em (3.29), obtém-se (3.31).

$$dW_m = -T_e \frac{2}{P} d\theta_r \quad (3.31)$$

Portanto, ao se considerar uma máquina de P polos, tem-se o torque eletromagnético como sendo definido de acordo com (3.32). Além disso, sabendo-se que L_e e L'_r não são funções de θ_r , e substituindo W_f de (3.28) em (3.32), determina-se a Equação (3.33), que retrata a produção do torque eletromagnético em Newton-metros ($N \cdot m$) (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013), (MARTINS, 2017).

$$T_e(i, \theta_r) = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{\partial W_c(i, \theta_r)}{\partial \theta_r} \quad (3.32)$$

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) (i_{eabc})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{er}] i'_{rabc} \quad (3.33)$$

A Equação (3.34), em que J e T_m correspondem a inércia e ao torque mecânico da máquina de indução, de acordo com a lei de Newton estabelece a relação da velocidade angular do rotor com o torque do gerador de indução, de modo que a velocidade angular do rotor ω_r é determinada por (3.35). (EDJTAHED S.; KARRARI, 2006), (MARTINS, 2017).

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (3.34)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3.35)$$

3.1.2 Potência da máquina de indução

A potência total instantânea trifásica pode ser descrita de acordo com a Equação (3.36) (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013), (DOMÍNGUEZ-GARCÍA J. L.; GOMIS-BELLMUNT, 2012).

$$P_{eabc} = V_{ea}i_{ea} + V_{eb}i_{eb} + V_{ec}i_{ec} \quad (3.36)$$

3.1.3 Equações da máquina de indução em variáveis de referência arbitrária

Na análise dinâmica de uma máquina de indução também é conveniente transformar as variáveis das principais equações de uma máquina de indução para um sistema de coordenadas dq. Dessa maneira, aplica-se transformadas de Park nas equações que modelam a máquina de indução, de modo que as equações da máquina sejam dadas em coordenadas dq.

Utilizando o mesmo procedimento mostrado na seção 2.1, o qual faz uso de (2.5) e (2.7) para converter do sistema de coordenadas abc para dq, obtém-se as equações de tensão, mostradas em (3.37) a (3.40), e de fluxo concatenado, mostradas em (3.41) a (3.44), em coordenadas dq. Nas Equações (3.41) a (3.44), $L_M = \frac{3}{2}L_{me}$ (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013), (MARTINS, 2017).

$$V_{eq} = r_e i_{eq} + \omega_m \lambda_{ed} + \phi \lambda_{eq} \quad (3.37)$$

$$V_{ed} = r_e i_{ed} - \omega_m \lambda_{eq} + \phi \lambda_{ed} \quad (3.38)$$

$$V'_{rq} = r'_r i'_{rq} + (\omega_m - \omega_r) \lambda'_{ed} + \phi \lambda'_{rq} \quad (3.39)$$

$$V'_{rd} = r'_r i'_{rd} - (\omega_m - \omega_r) \lambda'_{rq} + \phi \lambda'_{ed} \quad (3.40)$$

$$\lambda_{eq} = L_{le} i_{eq} + L_M (i_{eq} + i'_{rq}) \quad (3.41)$$

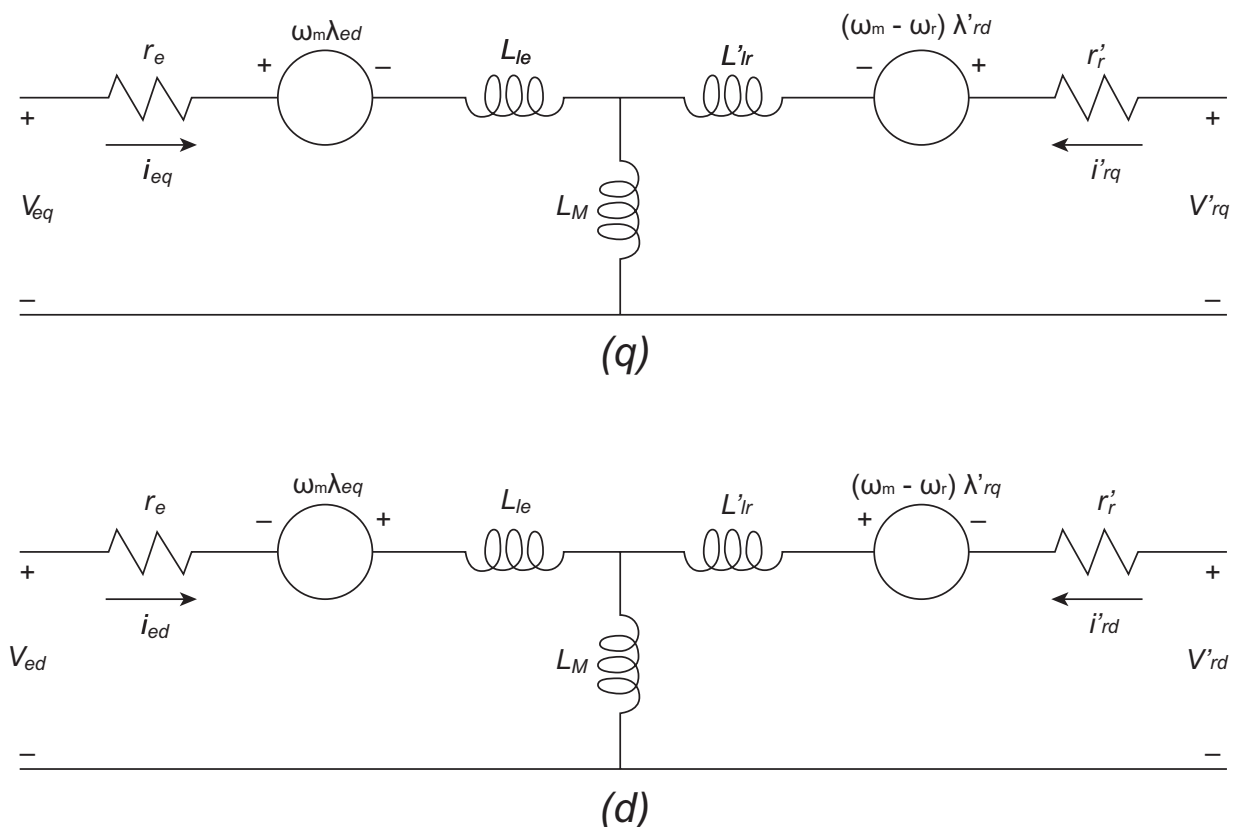
$$\lambda_{ed} = L_{le} i_{ed} + L_M (i_{ed} + i'_{rd}) \quad (3.42)$$

$$\lambda'_{rq} = L'_{lr} i'_{rq} + L_M (i_{eq} + i'_{rd}) \quad (3.43)$$

$$\lambda'_{rd} = L'_{lr} i'_{rd} + L_M (i_{ed} + i'_{rd}) \quad (3.44)$$

A Figura 17 ilustra os circuitos equivalentes da máquina de indução nas coordenadas dq, de acordo com (3.37) a (3.44).

Figura 17 – Circuitos equivalentes em coordenadas dq para uma máquina de indução trifásica e simétrica



Fonte: (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013).

A expressão para o torque eletromagnético em termos de variáveis de referência arbitrária é dada por (3.45). As Equações (3.46) e (3.47) representam expressões equivalentes

para o torque eletromagnético em uma máquina de indução. T_e é positivo para ação como motor e negativo para ação como gerador (KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, 2013).

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_M (i_{eq}i'_{rd} - i_{ed}i'_{rq}) \quad (3.45)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda'_{rq}i'_{rd} - \lambda'_{rd}i'_{rq}) \quad (3.46)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ed}i_{eq} - \lambda_{eq}i_{ed}) \quad (3.47)$$

As equações de potência em coordenadas dq são dadas de acordo com (3.48) e (3.49), em que P_e e Q_e são, respectivamente, a potência ativa e reativa do gerador de indução (DOMÍNGUEZ-GARCÍA J. L.; GOMIS-BELLMUNT, 2010).

$$P_e = \left(\frac{3}{2}\right) (V_{ed}i_{ed} + V_{eq}i_{eq}) \quad (3.48)$$

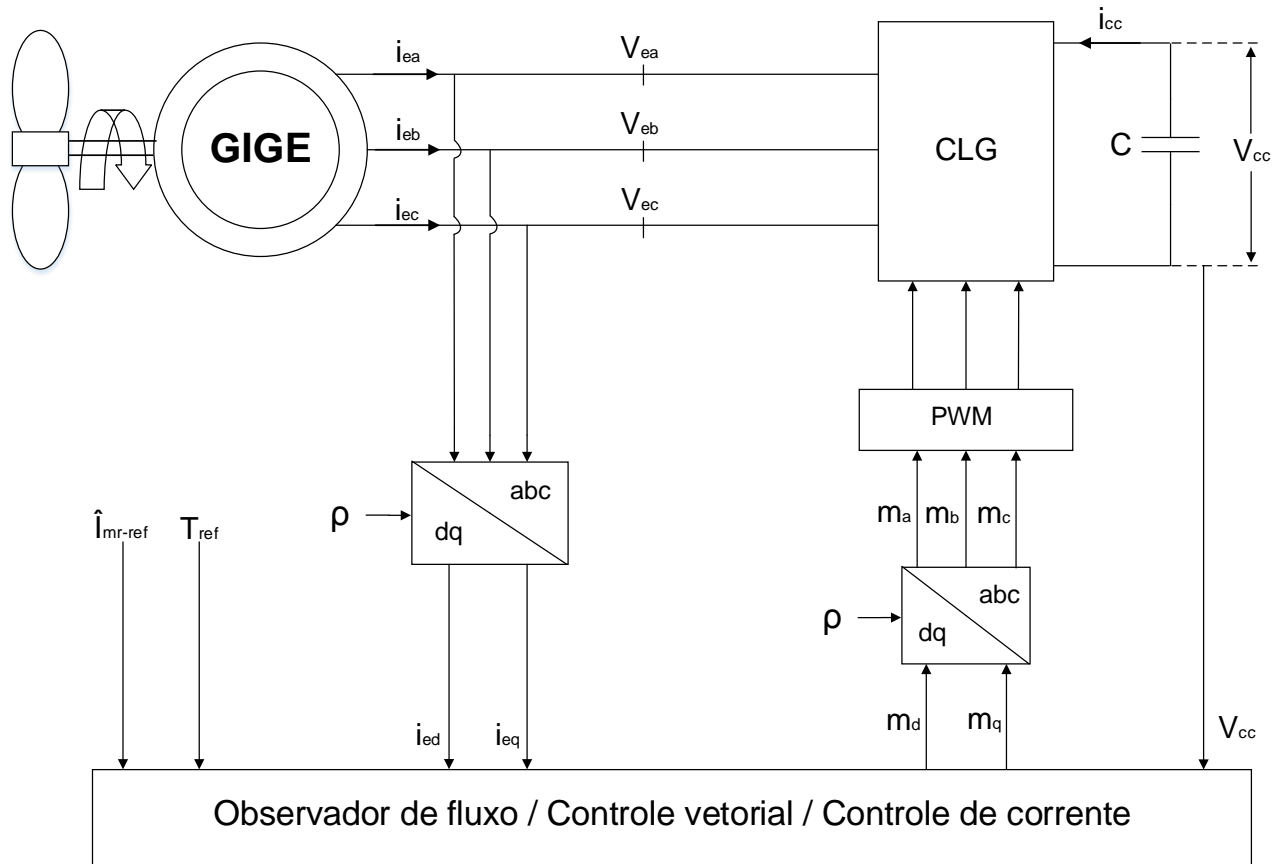
$$Q_e = \left(\frac{3}{2}\right) (-V_{ed}i_{eq} + V_{eq}i_{ed}) \quad (3.49)$$

3.2 Modelagem do controle do Conversor do Lado do Gerador (CLG)

Serão apresentadas nessa seção as estruturas de controle do sistema de geração eólica utilizando o gerador de indução gaiola de esquilo (GIGE), em que serão abordadas a modelagem do sistema dinâmico do gerador de indução, o modelo do gerador de indução rotor em gaiola em coordenadas campo do rotor, o observador de fluxo, o controle vetorial do gerador de indução, o desenvolvimento da corrente de magnetização e o torque de referência, o sistema de controle do conversor do lado do gerador e o projeto dos controladores de corrente do CLG.

A Figura 18 apresenta as estruturas de controle do sistema de geração eólica utilizando o GIGE.

Figura 18 – Diagrama esquemático do sistema para controlar o GIGE



Fonte: O autor.

3.2.1 Modelagem do sistema dinâmico do gerador de indução

As equações que governam a dinâmica de uma máquina CA, trifásica e simétrica, segundo (YAZDANI; IRAVANI, 2010), são representadas em (3.50) a (3.57), em que os fatores de dispersão do estator (σ_e) e do rotor (σ_r) são descritos em (3.58) e (3.59), respectivamente.

$$\frac{d\lambda_{ed}}{dt} = V_{ed} - R_e i_{ed} \quad (3.50)$$

$$\frac{d\lambda_{eq}}{dt} = V_{eq} - R_e i_{eq} \quad (3.51)$$

$$\frac{d\lambda_{rd}}{dt} = V_{rd} - R_r i_{rd} \quad (3.52)$$

$$\frac{d\lambda_{rq}}{dt} = V_{rq} - R_r i_{rq} \quad (3.53)$$

$$\lambda_{ed} = L_m [(1 + \sigma_e) i_{ed} + e^{j\theta_r} i_{rd}] \quad (3.54)$$

$$\lambda_{eq} = L_m [(1 + \sigma_e) i_{eq} + e^{j\theta_r} i_{rq}] \quad (3.55)$$

$$\lambda_{rd} = L_m [(1 + \sigma_r) i_{rd} + e^{-j\theta_r} i_{ed}] \quad (3.56)$$

$$\lambda_{rq} = L_m [(1 + \sigma_r) i_{rq} + e^{-j\theta_r} i_{eq}] \quad (3.57)$$

$$\sigma_e = \frac{L_{le}}{L_m} - 1 \quad (3.58)$$

$$\sigma_r = \frac{L_{lr}}{L_m} - 1 \quad (3.59)$$

V_{ed} e V_{eq} são as tensões no estator nas coordenadas d e q, respectivamente, V_{rd} e V_{rq} são as tensões no rotor nas coordenadas d e q, respectivamente, i_{ed} e i_{eq} são as correntes no estator nas coordenadas d e q, respectivamente, i_{rd} e i_{rq} são as correntes no rotor nas coordenadas d e q, respectivamente, R_e e R_r são as resistências no estator e no rotor, respectivamente, λ_{ed} e λ_{eq} são os fluxos concatenados no estator nas coordenadas d e q, respectivamente, λ_{rd} e λ_{rq} são os fluxos concatenados no rotor na direção d e q, respectivamente, e θ_r é o ângulo de rotação do rotor.

As indutâncias de dispersão do estator, do rotor, e indutância de magnetização são, respectivamente, L_{le} , L_{lr} e L_m , mostrados em (3.58) e (3.59). Substituindo (3.54) a (3.57), em (3.50) a (3.53), obtém-se (3.60) a (3.63).

$$L_m \frac{d}{dt} [(1 + \sigma_e) i_{ed} + e^{j\theta_r} i_{rd}] = V_{ed} - R_e i_{ed} \quad (3.60)$$

$$L_m \frac{d}{dt} [(1 + \sigma_e) i_{eq} + e^{j\theta_r} i_{rq}] = V_{eq} - R_e i_{eq} \quad (3.61)$$

$$L_m \frac{d}{dt} [(1 + \sigma_r) i_{rd} + e^{-j\theta_r} i_{ed}] = V_{rd} - R_r i_{rd} \quad (3.62)$$

$$L_m \frac{d}{dt} [(1 + \sigma_r) i_{rq} + e^{-j\theta_r} i_{eq}] = V_{rq} - R_r i_{rq} \quad (3.63)$$

3.2.2 Modelo do gerador de indução em coordenadas de campo do rotor

Considera-se uma máquina assíncrona de gaiola de esquilo em que os terminais do rotor estão em curto-circuito e a corrente do rotor não é mensurável. Então, $V_{rdq} = 0$ e i_{rdq} não é mensurável. Dessa forma, segundo (YAZDANI; IRAVANI, 2010), tem-se que a corrente de magnetização do rotor é dada por (3.64) e (3.65), em que \hat{i}_{mr} é a amplitude da corrente de magnetização e ρ é o ângulo do eixo girante das tensões e correntes do estator.

$$(i_{mrd} + j i_{mrq}) e^{j\rho} = \hat{i}_{mr} e^{j\rho} \quad (3.64)$$

$$(i_{mrd} + j i_{mrq}) e^{j\rho} = (1 + \sigma_r) (i_{rd} + j i_{rq}) e^{j\rho} e^{j\theta_r} + (i_{ed} + j i_{eq}) e^{j\rho} \quad (3.65)$$

Substituindo (3.65) em (3.64) e isolando i_{rdq} tem-se (3.66), que pode ser desmembrada em termos de d e q, como em (3.67) e (3.68).

$$(i_{rd} + j i_{rq}) e^{j\rho} = \frac{\hat{i}_{mr} - (i_{ed} + j i_{eq})}{1 + \sigma_r} e^{j(\rho - \theta_r)} \quad (3.66)$$

$$i_{rd} = \frac{\hat{i}_{mr} - i_{ed}}{1 + \sigma_r} e^{-j\theta_r} \quad (3.67)$$

$$i_{rq} = \frac{-i_{eq}}{1 + \sigma_r} e^{-j\theta_r} \quad (3.68)$$

O torque elétrico pode ser definido, segundo (YAZDANI; IRAVANI, 2010), de acordo com a Equação (3.69).

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{L_m}{1 + \sigma_r} \hat{i}_{mr} i_{eq} \quad (3.69)$$

Mantendo-se a corrente de magnetização \hat{i}_{mr} constante, o torque da máquina se torna uma função linear da componente de corrente i_{eq} . Dessa maneira, o torque pode ser controlado através da corrente de eixo em quadratura i_{eq} (YAZDANI; IRAVANI, 2010), (MARTINS, 2017).

Sabendo-se que o gerador utilizado é o GIGE, considera-se a tensão no enrolamento do rotor igual a zero. Expressando (3.62) e (3.63) em uma equação, obtém-se (3.70). Substituindo (3.66) em (3.70), obtém-se (3.71).

$$L_m \frac{d}{dt} [(1 + \sigma_r) ((i_{rd} + j i_{rq}) e^{j\rho}) + e^{-j\theta_r} ((i_{ed} + j i_{eq}) e^{j\rho})] = -R_r ((i_{rd} + j i_{rq}) e^{j\rho}) \quad (3.70)$$

$$L_m \frac{d}{dt} [\hat{i}_{mr} e^{j(\rho - \theta_r)}] = -R_r \left[\frac{(\hat{i}_{mr} - (i_{ed} + j i_{eq})) e^{j(\rho - \theta_r)}}{1 + \sigma_r} \right] \quad (3.71)$$

Reorganizando (3.71), obtém-se (3.72), de modo que esta pode ser reescrita como mostra a Equação (3.73), em que τ_r é a constante de tempo do rotor e é definida em (3.74).

$$\frac{L_m (1 + \sigma_r)}{R_r} \frac{d}{dt} [\hat{i}_{mr} e^{j(\rho - \theta_r)}] = -(\hat{i}_{mr} - (i_{ed} + j i_{eq})) e^{j(\rho - \theta_r)} \quad (3.72)$$

$$\tau_r \frac{d}{dt} [\hat{i}_{mr} e^{j(\rho - \theta_r)}] = (-\hat{i}_{mr} + (i_{ed} + j i_{eq})) e^{j(\rho - \theta_r)} \quad (3.73)$$

$$\tau_r = \frac{L_m (1 + \sigma_r)}{R_r} \quad (3.74)$$

Calculando a derivada de (3.73), multiplicando os resultados por $e^{-j(\rho - \theta_r)}$ ou $e^{j(-\rho + \theta_r)}$, simplificando os resultados e reorganizando, obtém-se (3.75), em que ω_m e ω_r são, respectivamente, a velocidade do campo magnético girante e a velocidade do rotor, definidas em (3.76) e (3.77), respectivamente.

$$\tau_r \frac{d}{dt} [\hat{i}_{mr}] + j (\omega_m - \omega_r) \tau_r \hat{i}_{mr} = -\hat{i}_{mr} + (i_{ed} + j i_{eq}) \quad (3.75)$$

$$\omega_m = \frac{d\rho}{dt} \quad (3.76)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3.77)$$

3.2.3 Observador de Fluxo

No gerador de indução tipo rotor gaiola de esquilo não existe a possibilidade de medir diretamente o fluxo e a corrente no rotor. Dessa forma, torna-se necessário o observador de fluxo para o controle do conversor do lado do gerador, para se obter a corrente de magnetização, o ângulo do campo girante e a velocidade do campo girante (MARTINS, 2017).

Decompondo (3.75) em componentes de eixo real e imaginário, obtém-se (3.78) e (3.79) para os componentes de eixo real e imaginário, respectivamente, de modo que (3.79) é reorganizada em (3.80).

$$\tau_r \frac{d}{dt} [\hat{i}_{mr}] = -\hat{i}_{mr} + i_{ed} \quad (3.78)$$

$$(\omega_m - \omega_r) \tau_r \hat{i}_{mr} = i_{eq} \quad (3.79)$$

$$\omega_m = \frac{i_{eq}}{\tau_r \hat{i}_{mr}} + \omega_r \quad (3.80)$$

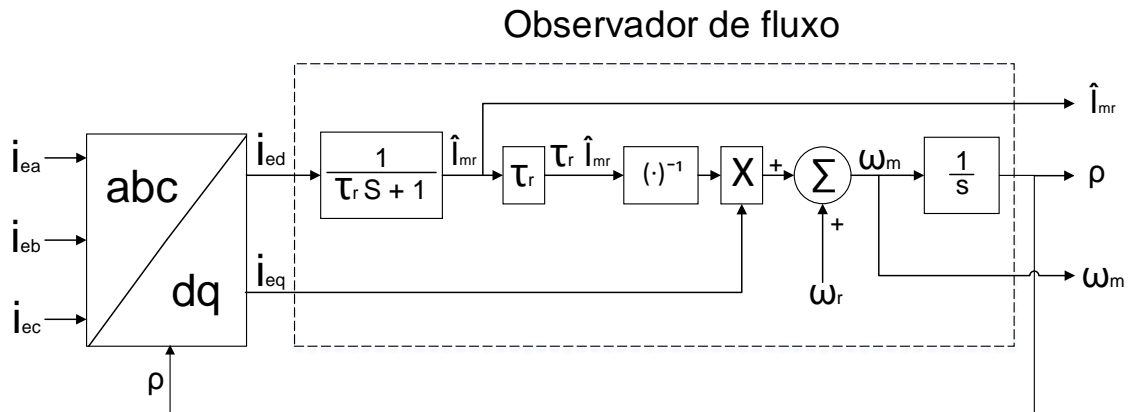
As Equações (3.76) a (3.80) descrevem a dinâmica do gerador de indução em coordenadas do campo do rotor. A Equação (3.78) representa um sistema linear de primeira ordem, com um ganho de unidade CC, em que i_{ed} , \hat{i}_{mr} e τ_r são, respectivamente, a entrada, a saída e a constante de tempo. Já as Equações (3.76) e (3.80) descrevem um sistema não linear que determina ρ com base nos valores de ω_r , i_{eq} e \hat{i}_{mr} .

Para inicializar o controle do conversor do lado do gerador é necessário primeiramente regular a corrente de magnetização da máquina, ou seja, antes de aplicar um torque ou gerar potência a partir do vento é preciso regular o fluxo da máquina. Além disso, a corrente de magnetização deve ser regulada em um valor constante, e baseado em (3.78), regular \hat{i}_{mr} é suficiente para regular i_{ed} em um valor constante e isso garante $\hat{i}_{mr} = i_{ed}$, o que é requerido por (3.69) para um controle de torque linear por i_{eq} (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Para regular a corrente de magnetização \hat{i}_{mr} de um gerador de indução devem ser considerados três procedimentos: (i) a regulação da corrente de magnetização \hat{i}_{mr} deve ser realizada durante o processo de inicialização do sistema do CLG, (ii) durante o processo de regulação da corrente de magnetização \hat{i}_{mr} , o gerador de indução deve permanecer na condição de estado estacionário, (iii) durante a regulação da corrente de magnetização do gerador de indução até que se alcance o regime permanente, a corrente de eixo em quadratura, i_{eq} , deve ser mantida em zero. Essas condições garantem que o fluxo do gerador seja estabelecido antes de qualquer demanda de torque. Além disso, a corrente de magnetização \hat{i}_{mr} só poderá ser aplicada após a tensão do barramento CC se estabilizar (YAZDANI; IRAVANI, 2010), (MARTINS, 2017).

A Figura 19 mostra o observador de fluxo, em que as entradas do sistema são as correntes de eixo direto e em quadratura do gerador (i_{ed} e i_{eq}) e a velocidade angular do rotor (ω_r), enquanto as saídas são a corrente de magnetização (\hat{i}_{mr}), o ângulo do campo magnético girante (ρ) e a velocidade do campo magnético girante (ω_m). As correntes i_{ed} e i_{eq} são obtidas através da transformação das coordenadas abc para dq utilizando o ângulo (ρ) obtido pelo observador de fluxo, enquanto que ω_r é obtido através do sensor de velocidade.

Figura 19 – Observador de fluxo



Fonte: O autor.

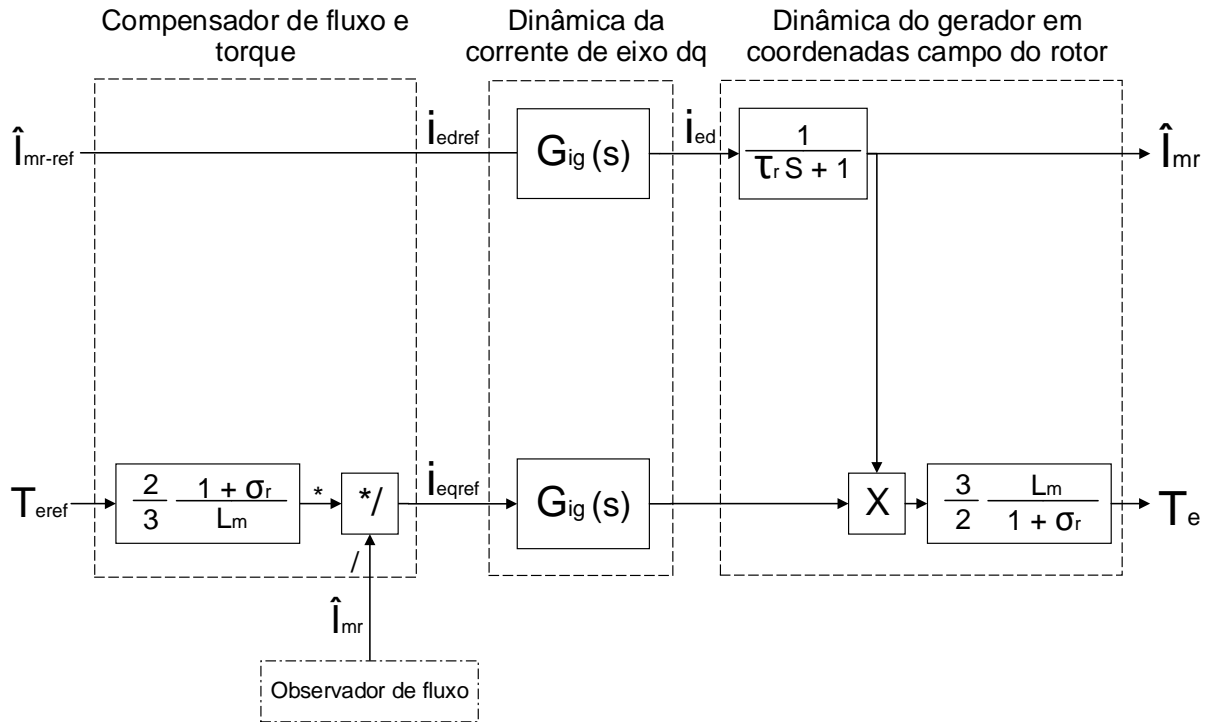
3.2.4 Controle vetorial do GIGE em coordenadas campo do rotor

A Figura 20 mostra o diagrama de blocos de um esquema para controle vetorial do GIGE, em função das coordenadas do campo do rotor. Através das Equações (3.69) e (3.78) é possível implementar o controle vetorial que está mostrado na Figura 20.

A corrente de magnetização deve ser regulada em um valor constante, para isso é suficiente regular a corrente de eixo direto do estator, já que a corrente de eixo direto do estator

será constante se a corrente de magnetização for regulada em um valor constante, de modo que é possível reescrever (3.81), que pode ser organizada como em (3.82) (MARTINS, 2017), (SOARES, 2015), (BATISTA, 2013).

Figura 20 – Controle vetorial do GIGE em coordenadas campo do rotor



Fonte: O autor.

$$i_{ed} = \frac{\lambda_r}{L_m} \quad (3.81)$$

$$\lambda_r = i_{ed} L_m \quad (3.82)$$

i_{ed} , λ_r e L_m são a corrente de eixo direto do estator, o fluxo do rotor e a indutância mútua, respectivamente. Relacionando (3.56), (3.57), (3.62), (3.63) e (3.65), obtém-se (3.83) e (3.84), em que (\hat{i}_{mr}) é igual a i_{ed} .

$$i_{ed} = \frac{\hat{i}_{mr}}{L_m} \quad (3.83)$$

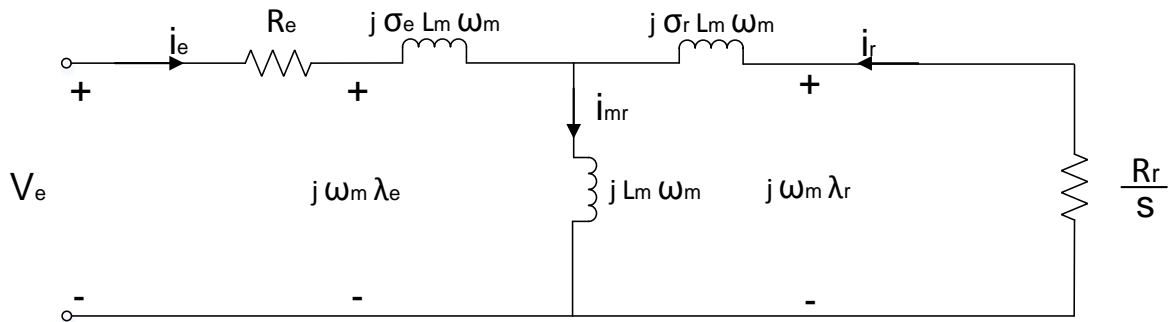
$$i_{ed} = \hat{i}_{mr} L_m \quad (3.84)$$

As correntes de referência de eixo direto e em quadratura do estator do gerador, i_{edref} e i_{eqref} , obtidas através do controle vetorial mostrado na Figura 20, são referências inseridas no sistema de controle de corrente do CLG.

3.2.5 Corrente de magnetização e torque de referência do gerador

A Figura 21 mostra o circuito equivalente por fase para um gerador de indução, em que $|i_e|$ é a corrente de pico do estator, $|V_e|$ é a tensão de pico de linha do estator para o neutro e s é o escorregamento, que é descrito em (3.85), em que n_e e n_r são as velocidades em rpm do estator e do rotor, respectivamente.

Figura 21 – Circuito equivalente da máquina de indução



Fonte: O autor.

$$s = \frac{n_e - n_r}{n_e} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} \quad (3.85)$$

Com base na Figura 21, a corrente de magnetização de um gerador de indução gaiola de esquilo pode ser calculada, de modo que quando $\omega_m = \omega_r$, ou seja, quando a velocidade angular do estator for igual a velocidade angular do rotor, a corrente do rotor i_r é igual a zero, e a corrente do estator é igual à corrente de magnetização, $i_e = i_{mr}$ (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

Aplicando a lei das malhas no circuito da Figura 21 e considerando a queda de tensão desprezível em R_e , tem-se (3.86). A corrente de pico do estator pode ser expressa como $|i_e| = \hat{i}_e = \sqrt{i_{ed}^2 + i_{eq}^2}$, de forma que (3.86) pode ser reescrita como (3.87), em que V_{e-ll} é a tensão de linha, rms, do estator .

$$|i_e| = |i_{mr}| \simeq \frac{|V_e|}{(1 + \sigma_e) L_m \omega_m} \quad (3.86)$$

$$\sqrt{i_{ed}^2 + i_{eq}^2} \simeq \frac{\sqrt{2} \left(\frac{V_{e-ll}}{\sqrt{3}} \right)}{(1 + \sigma_e) L_m \omega_m} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{e-ll}}{(1 + \sigma_e) L_m \omega_m} \quad (3.87)$$

Segundo (YAZDANI; IRAVANI, 2010), no estado estacionário, $\hat{i}_{mr} = i_{ed}$ e $i_{eq} = 0$, com $\omega_m = \omega_r$, obtendo-se (3.88). A partir de (3.88), (3.87) é reescrita como (3.89), em que \hat{i}_{mr} é o valor de pico da corrente de magnetização do gerador.

$$\sqrt{i_{ed}^2 + i_{eq}^2} = i_{ed} = \hat{i}_{mr} \quad (3.88)$$

$$\hat{i}_{mr} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{e-ll}}{(1 + \sigma_e) L_m \omega_r} \quad (3.89)$$

Portanto, \hat{i}_{mr-ref} deve ser ajustado na corrente de magnetização nominal do gerador, ou seja, correspondente à tensão nominal V_{en} e $\omega_r = \omega_{m0}$. Assim, obtém-se (3.90), em que V_{en} é a tensão rms de linha nominal do estator e ω_{m0} é a velocidade angular nominal do gerador, ou seja, está na frequência nominal do gerador $\omega_{m0} = 2 \pi f_{m0}$. Além disso, o torque de referência é obtido através de (3.91), em que P_{ref} é a potência de referência desejada, que assume valor negativo já que se trata de um gerador.

$$\hat{i}_{mr-ref} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{en}}{(1 + \sigma_e) L_m \omega_{m0}} \quad (3.90)$$

$$T_{eref} = \frac{P_{ref}}{\omega_r} \quad (3.91)$$

3.2.6 Sistema de controle de corrente do conversor do lado do gerador

O fluxo concatenado e o torque do gerador são controlados, respectivamente, por i_{ed} e i_{eq} . No entanto, o CLG só pode controlar a tensão do estator. Portanto, é preciso desenvolver expressões matemáticas para relacionar i_{ed} e i_{eq} a V_{ed} e V_{eq} .

A partir de (3.50), (3.51), (3.54) e (3.55), substituindo i_{rd} e i_{rq} de (3.70) e (3.71) em (3.54) e (3.55), e substituindo λ_{edq} de (3.50) e (3.51), obtém-se a Equação (3.92).

$$L_m \frac{d}{dt} \left[\frac{(1 + \sigma_e)(1 + \sigma_r) - 1}{(1 + \sigma_r)} (i_{edq} e^{j\rho}) + \frac{1}{1 + \sigma_r} \hat{i}_{mr} e^{j\rho} \right] = (V_{edq} e^{j\rho}) - R_e (i_{edq} e^{j\rho}) \quad (3.92)$$

O fator de dispersão total do gerador, σ , é definido por (YAZDANI; IRAVANI, 2010) como ilustrado em (3.93). A Equação (3.92) pode ser expressa em função do fator de dispersão total do gerador de indução, conforme dada em (3.94). Dividindo os dois lados de (3.94) por R_e , obtém-se (3.95), em que τ_e é a constante de tempo do estator e definida em (3.96).

$$\sigma = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_e)(1 + \sigma_r)} \quad (3.93)$$

$$L_m \sigma (1 + \sigma_e) \frac{d}{dt} (i_{edq} e^{j\rho}) + L_m (1 - \sigma) (1 + \sigma_e) \frac{d}{dt} \hat{i}_{mr} e^{j\rho} = (V_{edq} e^{j\rho}) - R_e (i_{edq} e^{j\rho}) \quad (3.94)$$

$$\sigma \tau_e \frac{d}{dt} (i_{edq} e^{j\rho}) + (1 - \sigma) \tau_e \frac{d}{dt} \hat{i}_{mr} e^{j\rho} = \frac{1}{R_e} (V_{edq} e^{j\rho}) - (i_{edq} e^{j\rho}) \quad (3.95)$$

$$\tau_e = \frac{L_m (1 + \sigma_e)}{R_e} \quad (3.96)$$

Calculando a derivada de (3.95) e multiplicando ambos os lados por $e^{-j\rho}$, obtém-se (3.97). Decompondo (3.97) em componentes real e imaginário, tem-se (3.98) e (3.99).

$$\sigma \tau_e \frac{di_{edq}}{dt} + i_{edq} = -j \sigma \tau_e \omega_m i_{edq} - j (1 - \sigma) \tau_e \omega_m \hat{i}_{mr} - (1 - \sigma) \tau_e \frac{d\hat{i}_{mr}}{dt} + \frac{1}{R_e} V_{edq} \quad (3.97)$$

$$\sigma \tau_e \frac{di_{ed}}{dt} + i_{ed} = \sigma \tau_e \omega_m i_{eq} - (1 - \sigma) \tau_e \frac{d\hat{i}_{mr}}{dt} + \frac{1}{R_e} V_{ed} \quad (3.98)$$

$$\sigma \tau_e \frac{di_{eq}}{dt} + i_{eq} = -\sigma \tau_e \omega_m i_{ed} - (1 - \sigma) \tau_e \omega_m \hat{i}_{mr} + \frac{1}{R_e} V_{eq} \quad (3.99)$$

As Equações (3.98) e (3.99) representam um sistema não linear, em que V_{ed} e V_{eq} são entradas, e i_{ed} e i_{eq} são saídas e também as variáveis de estado. Com base em (3.98) e (3.99), as dinâmicas de i_{ed} e i_{eq} são acopladas. Além disso, o sistema é não linear devido aos termos $\omega_m i_{ed}$, $\omega_m i_{eq}$ e $\omega_m \hat{i}_{mr}$, tendo em vista que ω_m e \hat{i}_{mr} são ambas funções de i_{ed} e i_{eq} . Se duas novas entradas de controle, denominadas u_d e u_q , definidas por (3.100) e (3.101), forem adicionadas ao

sistema de controle, essa não linearidade pode ser evitada no controle (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

$$u_d = \sigma \tau_e \omega_m i_{eq} - (1 - \sigma) \tau_e \frac{d\hat{i}_{mr}}{dt} + \frac{1}{R_e} V_{ed} \quad (3.100)$$

$$u_q = -\sigma \tau_e \omega_m i_{ed} - (1 - \sigma) \tau_e \omega_m \hat{i}_{mr} + \frac{1}{R_e} V_{eq} \quad (3.101)$$

Substituindo (3.100) e (3.101) em (3.98) e (3.99), obtém-se as Equações (3.102) e (3.103), as quais constituem um sistema desacoplado, linear e de primeira ordem. A ideia é ter um sistema baseado em dois subsistemas, no qual o primeiro subsistema controla i_{ed} por u_d , enquanto o segundo subsistema controla i_{eq} por u_q . Por sua vez, u_d e u_q são obtidos de dois compensadores PI correspondentes. Um compensador processa $i_{edref} - i_{ed}$ e fornece u_d , enquanto o outro processa $i_{eqref} - i_{eq}$ e fornece u_q .

$$\sigma \tau_e \frac{di_{ed}}{dt} + i_{ed} = u_d \quad (3.102)$$

$$\sigma \tau_e \frac{di_{eq}}{dt} + i_{eq} = u_q \quad (3.103)$$

A Figura 22 ilustra a implementação do sistema de controle de corrente para o conversor do lado do gerador utilizando a referência dq. Fazendo-se uso dos mesmos conceitos utilizados para a implementação do sistema de controle do conversor do lado da rede, os índices de modulação, m_d e m_q , devem ser calculados dividindo V_{ed} e V_{eq} por $\frac{V_{cc}}{2}$. Deste modo, os índices de modulação passarão por um gerador de PWM para gerar os pulsos que acionam o CLG (MARTINS, 2017).

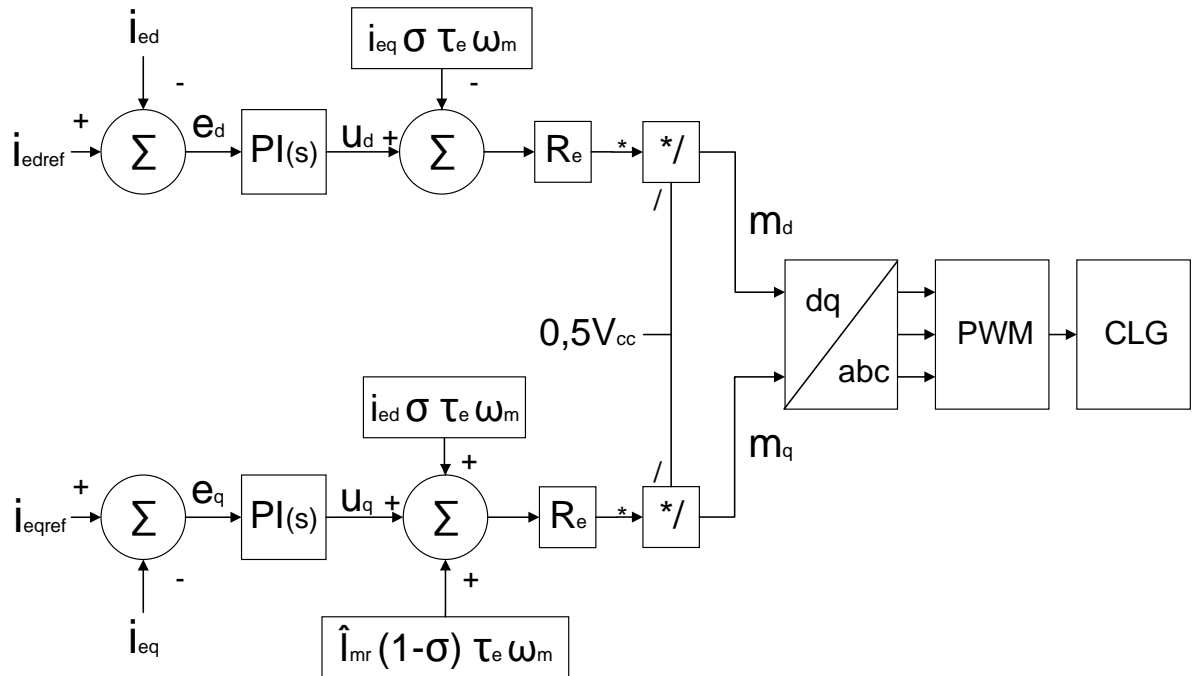
3.2.7 Projeto de controladores do controle de corrente elétrica do CLG em coordenadas dq

A Figura 22 mostra uma representação em diagrama de blocos dos controladores de corrente do eixo direto e de quadratura do sistema de controle do conversor eletrônico conectado ao GIGE. A representação da Figura 22 pode ser simplificada, sendo mostrada na Figura 23.

Na Figura 23, o sistema de controle simplificado do controlador de corrente do CLG é formado por três blocos: $PI(s)$, $G_p(s)$ e $G_g(s)$. O bloco $PI(s)$ é um controlador PI. O bloco

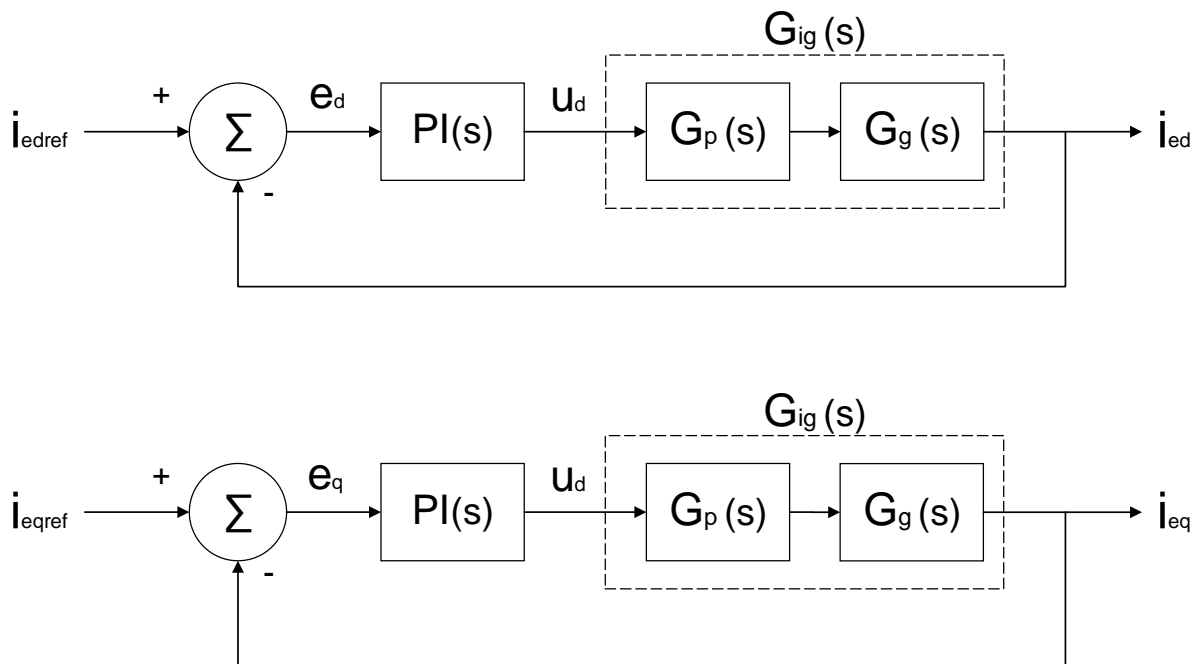
$G_p(s)$ representa a dinâmica do PWM do conversor eletrônico CC-CA. Já o bloco $G_g(s)$ é a planta do GIGE. Na Figura 23, $G_{ig}(s)$ é o produto dos blocos $G_p(s)$ e $G_g(s)$ em cascata.

Figura 22 – Sistema de controle de corrente do conversor do lado do gerador



Fonte: O autor.

Figura 23 – Diagramas de blocos simplificados dos controladores de corrente elétrica do CLG em coordenadas dq



Fonte: O autor.

As funções de transferência da dinâmica do PWM e do GIGE são dadas por $G_p(s)$ e $G_g(s)$, respectivamente, de acordo com (2.34) e (3.104). É necessário frisar que a Equação (3.104), que representa a função de transferência do GIGE, é a equação dinâmica do estator do GIGE.

$$G_g(s) = \frac{1}{\sigma\tau_e s + 1} \quad (3.104)$$

Aplicando a metodologia de projeto dos controladores PI descrita em 2.3.1 e utilizando a malha aberta da Figura 23, determina-se os parâmetros do controlador PI do controle de corrente do conversor do lado do gerador de acordo com as Equações (3.105) e (3.106) (MOREIRA, 2017).

$$T_i = \frac{1}{\omega_c \cdot \tan(\pi + \angle G_{ig}(j\omega_c) - MF_d)} \quad (3.105)$$

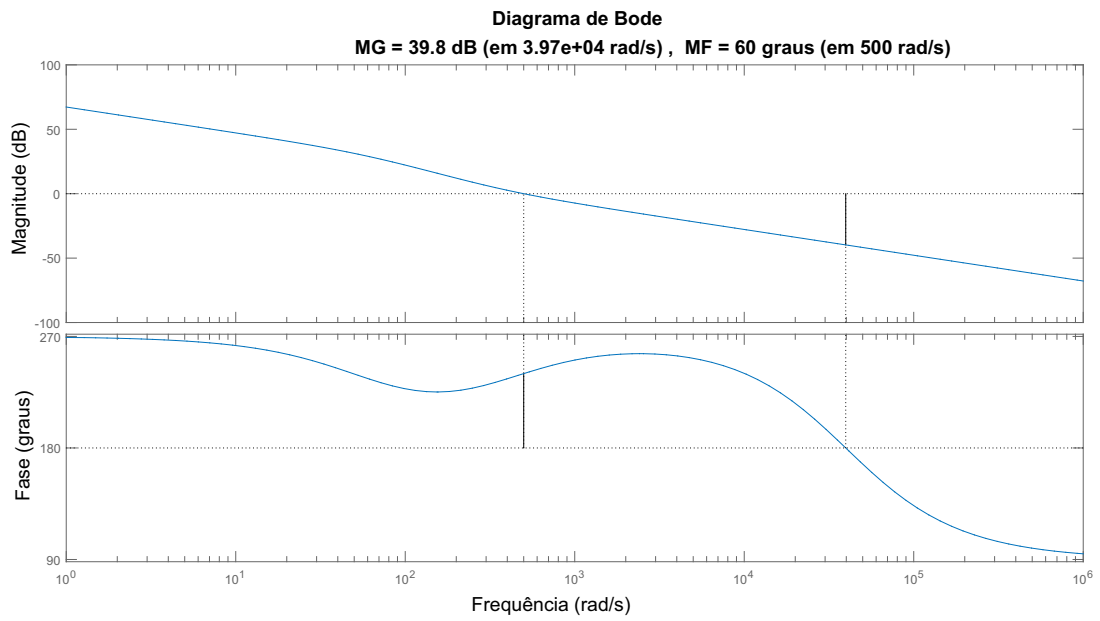
$$k_p = \frac{1}{|G_{ig}(j\omega_c)| \cdot \left|1 - \frac{j}{\omega_c T_i}\right|} \quad (3.106)$$

A partir de (3.105) e (3.106), e de $\omega_c = 500 \text{ rad/s}$ e $MF = 60^\circ$, adotados, obteve-se $k_p = 6,3986$ e $T_i = 0,0028$ para o controlador de corrente do CLG. Além disso, o valor da frequência de cruzamento utilizado nesse controlador foi escolhido a partir dos resultados obtidos em simulações.

Adquiriu-se a resposta em frequência do controlador projetado com a ajuda do software *MATLAB*. A Figura 24 mostra a resposta em frequência do sistema controlado pelo controlador de corrente do CLG.

Na Figura 24, observa-se que as condições necessárias são seguidas, já que a margem de ganho é maior que 6 dB e a margem de fase é de 60° para a frequência de cruzamento de 500 rad/s .

Figura 24 – Resposta em frequência de malha aberta do controlador de correntes elétricas do CLG

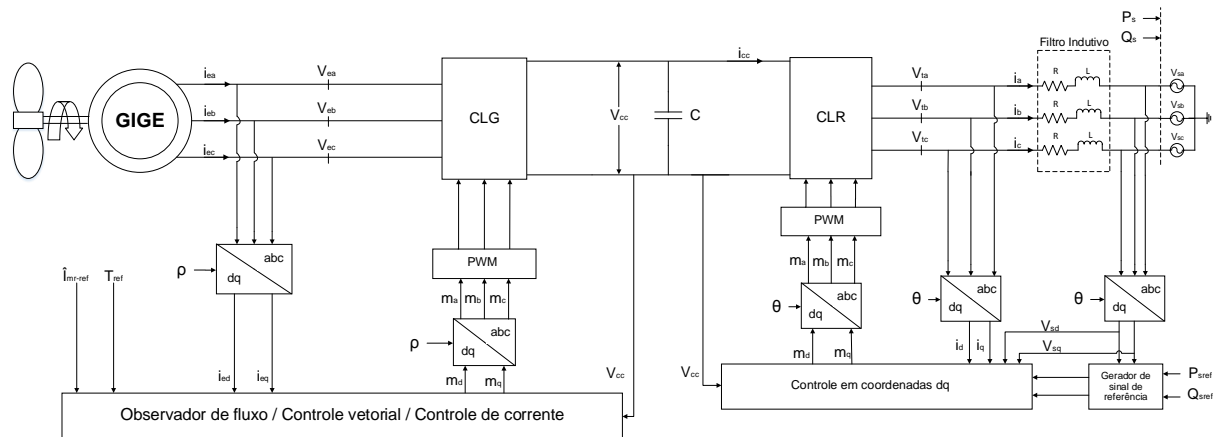


Fonte: O autor.

4 RESULTADOS

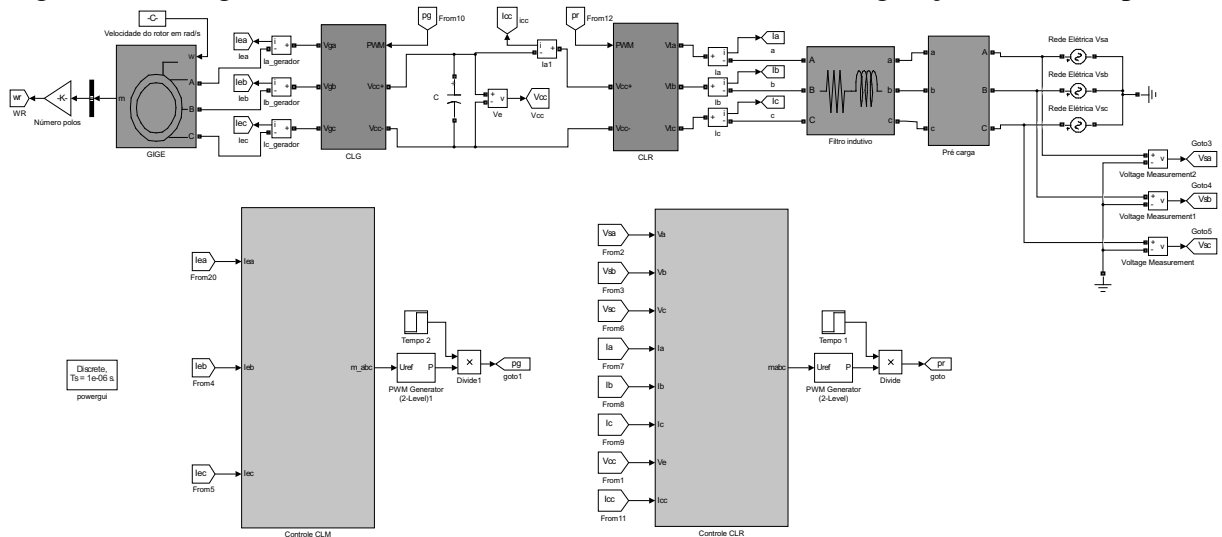
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na simulação do sistema proposto de geração eólica conectado a rede elétrica. A Figura 25 ilustra o sistema completo que foi modelado e simulado usando o software *Matlab/Simulink*[®], composto pelos conversores eletrônicos (CLR e CLG) e pelo GIGE. O sistema foi montado conforme o diagrama de blocos mostrado na Figura 26.

Figura 25 – Sistema de geração eólica completo



Fonte: O autor.

Figura 26 – Diagrama montado no Matlab/Simulink do Sistema de geração eólica completo



Fonte: O autor.

Os parâmetros do gerador utilizados na simulação foram obtidos a partir de (HEYDARI M.; VARJANI, 2012) e estão presentes na Tabela 1 do Apêndice A. Além disso, para o sistema da Figura 26, tem-se que o modelo do gerador elétrico de indução gaiola de esquila

utilizado está presente na biblioteca *SimPowerSystem* do *Simulink*.

Durante a operação do sistema de geração eólica, para facilitar as análises, admite-se que a velocidade do vento e do gerador elétrico são constantes, e igual a 190 rad/s. Além disso, considera-se que o gerador fornece uma potência de 10 kW.

4.1 Resultados do sistema de geração eólica para o controle do CLR

O controle de potências ativa e reativa do gerador é realizado a partir do controle do CLG, enquanto o controle do CLR mantém a tensão elétrica no barramento CC constante. Dessa forma, para garantir o bom funcionamento do sistema de geração eólica é fundamental projetar adequadamente o controle do CLR.

O controle do CLR é composto basicamente por três componentes: PLL, Controle de tensão do barramento CC e controle de corrente do CLR. Então, é primordial que esses três componentes funcionem de acordo com o esperado para o bom funcionamento do sistema eólico proposto.

A implementação do controle do CLR feita no software MatLab/Simulink é apresentada no Apêndice B.

4.1.1 PLL

O PLL é um dos integrantes do controle do CLR. Antes de se conectar o conversor eletrônico de potência com a rede elétrica, o algoritmo de sincronismo do PLL é executado a fim de se obter as tensões de eixos direto e em quadratura, V_d e V_q , e o ângulo teta (θ) do PLL. É necessário que a frequência do ângulo teta (θ) possua a mesma frequência da tensão da rede elétrica.

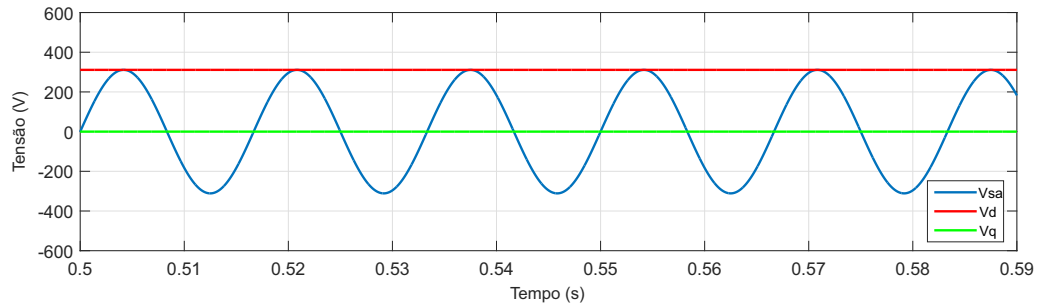
As Figuras 27 e 28 apresentam os resultados dos sinais do PLL obtidos a partir da simulação do sistema proposto.

A Figura 27 apresenta a tensão da rede elétrica na fase A (V_{sa}), tensão de eixo direto da rede elétrica (V_d) e tensão de eixo em quadratura da rede elétrica (V_q). Observa-se que (V_d) assume o valor de pico da tensão da rede elétrica, enquanto (V_q) é mantida em zero, ambas em regime permanente.

Já a Figura 28 apresenta a tensão da rede elétrica na fase A (V_{sa}), o ângulo teta (θ), e frequência do ângulo teta (θ). Observa-se que o ângulo teta (θ) apresenta a mesma frequência

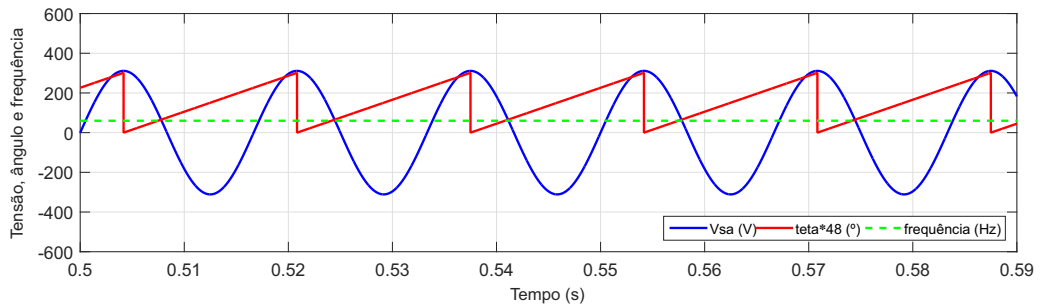
da tensão da rede elétrica, 60 Hz.

Figura 27 – Tensão da rede elétrica V_{sa} e tensões V_d e V_q obtidas a partir do PLL



Fonte: O autor.

Figura 28 – Tensão da rede elétrica V_{sa} , frequência da rede elétrica e ângulo teta (θ) obtido a partir do PLL

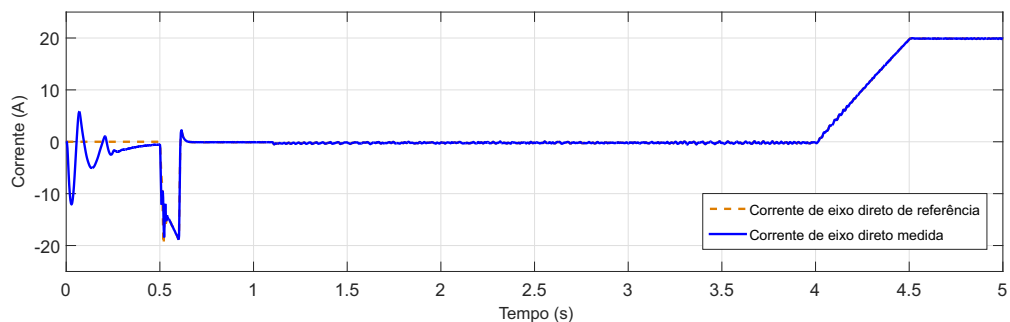


Fonte: O autor.

4.1.2 Sistema de controle de corrente do CLR

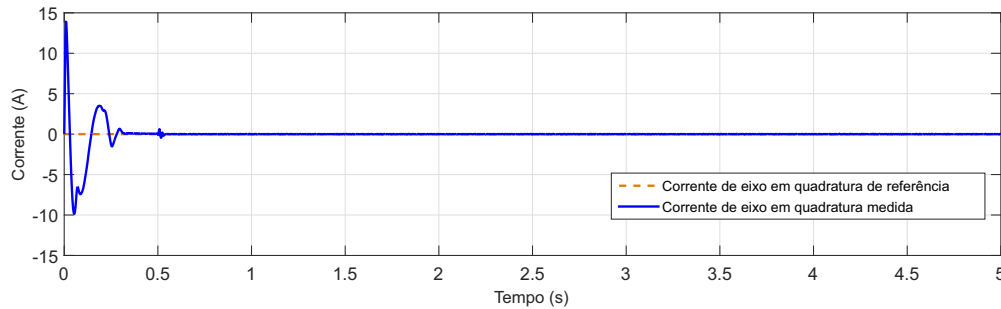
O sistema de controle de corrente do CLR foi simulado de acordo com a Figura 10. As Figuras 29 e 30 ilustram as correntes de eixo direto e quadratura, respectivamente, enviadas à rede elétrica.

Figura 29 – Corrente de eixo direto de referência e corrente de eixo direto medida



Fonte: O autor.

Figura 30 – Corrente de eixo em quadratura de referência e corrente de eixo em quadratura medida



Fonte: O autor.

Inicialmente, quando se inicia a simulação do sistema de geração eólica, o sistema de controle de corrente do CLR é mantido desligado, sendo acionado a partir de 0,5 s, após o sinal do PLL estar estabilizado.

A Figura 29 mostra a corrente i_d medida e sua referência i_{dref} , em que a corrente medida segue a referência, mostrando o bom funcionamento do controle. Observa-se que a partir do acionamento do sistema de controle de corrente do CLR, em 0,5 s, i_d apresenta valores negativos de 0,5 s a 0,6 s, o que é compreensível, já que é nesse intervalo de tempo que o sistema de controle do barramento CC estabiliza a tensão requerida do barramento CC, fazendo com que a corrente circule da rede elétrica em direção ao barramento, consumindo potência da rede elétrica. Após o barramento CC se estabilizar, em 0,6 s, i_d se mantém constante em zero até 4,0 s. A partir de 4,0 s, i_d apresenta valor crescente (em rampa), até estabilizar seu valor em aproximadamente 20 A em 4,5 s, e isso é justificado já que o gerador começa a fornecer potência ativa à rede elétrica em 4,0 s e como i_d está diretamente relacionada com a potência ativa enviada à rede elétrica, ela varia proporcionalmente com a potência ativa enviada.

A Figura 30 mostra a corrente i_q medida e sua referência i_{qref} , em que a corrente medida segue a referência, mostrando o bom funcionamento do controle. Observa-se que i_q é mantida em 0 A durante todo o tempo, e isso é justificado já que a potência reativa enviada à rede elétrica é mantida em zero e i_q está diretamente relacionada com a potência reativa enviada à rede elétrica.

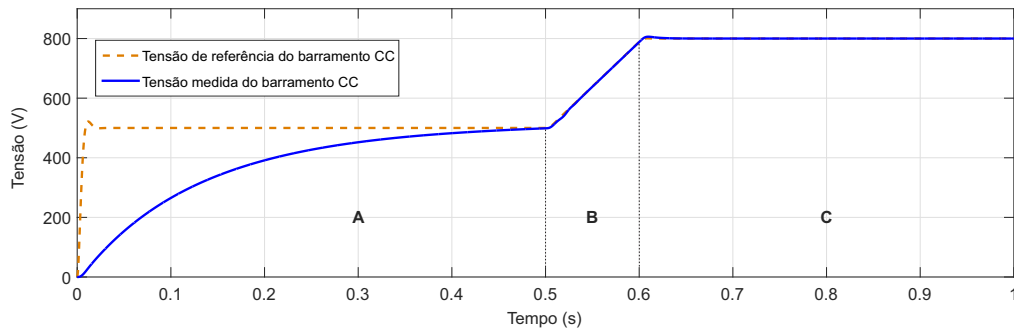
4.1.3 Sistema de controle da tensão do barramento CC

O sistema de controle da tensão do barramento CC foi simulado de acordo com a Figura 11. A Figura 31 ilustra o comportamento da tensão do barramento CC.

A Figura 31 mostra a tensão medida do barramento CC (V_{cc}) seguindo a tensão CC

de referência (V_{ccref}), mostrando o bom funcionamento do controle. Como se observa na Figura 31, o processo de controle do barramento CC é dividido em três etapas: A, B e C.

Figura 31 – Tensão de referência do barramento CC e tensão medida no barramento CC



Fonte: O autor.

Observa-se que na etapa A a tensão elétrica do barramento CC cresce até atingir o valor de 500 V. Durante essa etapa, o sistema de controle da tensão do barramento CC está desligado (o que explica o fato da tensão medida não seguir a referência), as chaves eletrônicas paradas e as correntes elétricas são limitadas pelos resistores de pré-carga. Manter as chaves eletrônicas paradas durante esse período é necessário, já que as correntes elétricas provenientes da rede elétrica no instante da partida crescem de forma exponencial até que a tensão do barramento alcance o valor de 500 V, o que pode causar danos às chaves eletrônicas de potência do conversor eletrônico e aos capacitores do barramento CC. Dessa forma, o processo de conexão do CLR com a rede elétrica é implementado de modo a limitar essas correntes durante essa etapa por meio do circuito de pré-carga.

Na etapa B, o sistema de controle da tensão do barramento CC é acionado, a tensão elétrica medida no barramento CC (V_{cc}) começa a seguir a referência e é regulada em 800 V, utilizando-se uma função em rampa para que a tensão do barramento CC varie de 500 V a 800 V. Durante essa etapa o sistema de pré-carga é desligado e o CLR se conecta à rede elétrica sem percorrer os resistores de pré-carga, uma vez que as correntes já têm se normalizado. Segundo (MOREIRA, 2017), o uso da função em rampa se torna importante já que ela é utilizada para reduzir os picos de correntes elétricas, bem como contribuir com pequeno sobressinal de tensão elétrica do barramento CC durante a operação do controle do conversor eletrônico.

Na etapa C, o sistema de controle da tensão do barramento CC mantém a tensão elétrica medida no barramento CC (V_{cc}) constante em 800 V. Nessa etapa, o sistema de controle de corrente do CLR é acionado de forma estável, regulando as correntes elétricas e tensão elétrica no barramento CC, fazendo com que o CLR estabeleça o sincronismo com a rede elétrica.

4.2 Resultados do sistema de geração eólica para o controle do CLG

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na simulação do sistema de geração eólica para o controle do conversor do lado do gerador.

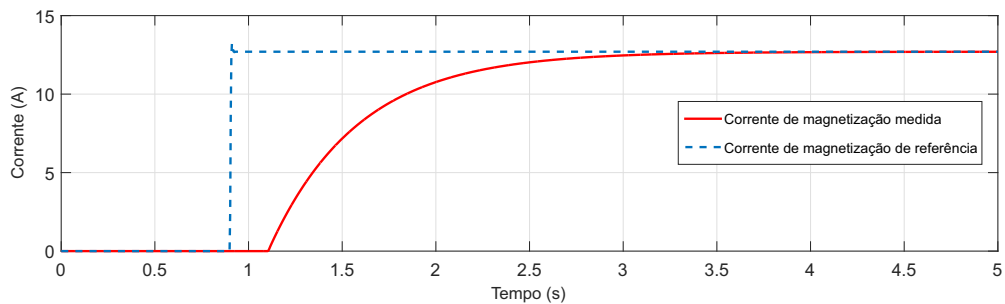
O controle do CLG é composto basicamente por três componentes: observador de fluxo, o controle vetorial e o sistema de controle de corrente do CLG, de modo que o observador de fluxo e o controle vetorial podem ser considerados um só componente, já que trabalham juntos para obter o controle da corrente de magnetização do gerador (i_{mr}) e o torque elétrico do gerador (T_e).

A implementação do controle do CLG feita no software MatLab/Simulink é apresentada no Apêndice C.

4.2.1 Observador de fluxo e o controle vetorial

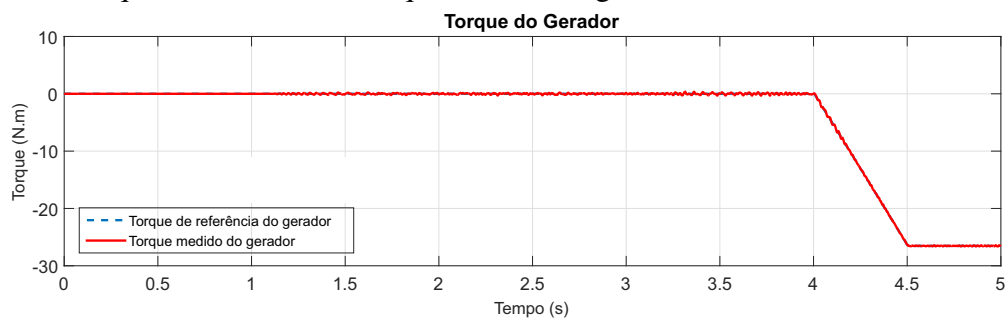
O observador de fluxo e o controle vetorial foram simulados de acordo com as Figuras 19 e 20. As Figuras 32 e 33 ilustram a corrente de magnetização medida do gerador e sua referência e o torque medido e sua referência.

Figura 32 – Corrente de magnetização de referência e corrente de magnetização medida do gerador



Fonte: O autor.

Figura 33 – Torque de referência e torque medido do gerador



Fonte: O autor.

Na Figura 32 a corrente de referência é acionada após a estabilização da tensão elétrica do barramento CC, a partir de 0,9 s, enquanto o controle da corrente de magnetização é acionado a partir de 1,1 s. Através da Equação (3.89) e dos parâmetros do gerador, o valor da corrente de magnetização de referência calculado foi de 12,7 A.

Dessa forma, aplicou-se um degrau de referência com o valor obtido de corrente de magnetização, a fim de que a corrente de magnetização medida siga a referência. Observa-se na Figura 32 que a corrente de magnetização medida consegue alcançar o valor de referência e segui-lo de forma exata aproximadamente em 4,0 s, mostrando que o sistema de controle para a corrente de magnetização do gerador está funcionando de forma adequada.

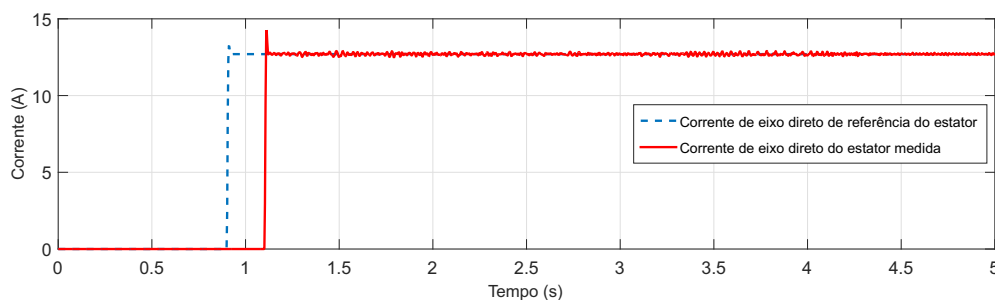
De acordo com a Equação (3.91), o torque está diretamente relacionado com a potência ativa de referência, o que faz com que o torque varie proporcionalmente com a variação da potência de referência do gerador. Além disso, por se tratar de um gerador, o torque é negativo.

A potência de referência do gerador foi aplicada (e somente pode ser aplicada) após a estabilização da corrente de magnetização do gerador, sendo aplicada uma função em rampa de potência ativa de referência no valor de 0 kW a -10 kW, iniciada no instante de tempo de 4,0 s, enquanto o gerador opera a uma velocidade angular mecânica do rotor constante de 190 rad/s. Assim, como se observa na Figura 33, o torque atinge o valor aproximado de -26,4 N.m, e segue sua referência, mostrando que o sistema de controle para o torque do gerador está funcionando de forma adequada.

4.2.2 Sistema de controle de corrente do CLG

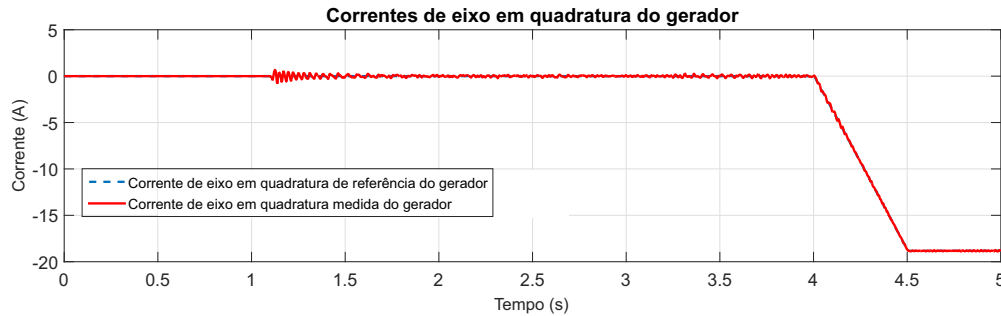
O sistema de controle de corrente do CLG foi simulado de acordo com a Figura 22. As Figuras 34 e 35 ilustram as correntes de eixo direto e quadratura, respectivamente, do estator do gerador.

Figura 34 – Corrente de eixo direto de referência do estator e corrente de eixo direto do estator medida



Fonte: O autor.

Figura 35 – Corrente de eixo em quadratura de referência do estator e corrente de eixo em quadratura medida do estator



Fonte: O autor.

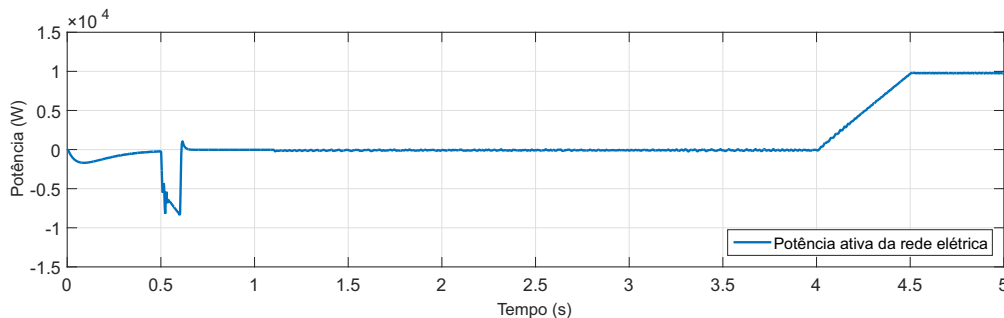
A Figura 34 mostra a corrente de eixo direto de referência do estator (i_{edref}) e a corrente de eixo direto medida do estator (i_{ed}), em que a corrente de eixo direto do estator medida segue a referência a partir do acionamento do controle de corrente do CLG, iniciando no instante $t= 1,1$ s até $t= 5$ s, mostrando o funcionamento adequado do controle.

A Figura 35 mostra a corrente de eixo em quadratura de referência do estator (i_{eqref}) e a corrente de eixo em quadratura medida do estator (i_{eq}), em que i_{eq} segue a referência i_{eqref} . Observa-se que i_{eq} é mantida em 0 A até 4,0 s, e isso é justificado, como observado na Figura 20, já que i_{eq} está diretamente relacionada com o torque do gerador. Assim, a partir do momento em que a potência de referência do gerador é inserida no sistema, passa a haver torque, como observado na Figura 33, e i_{eq} varia proporcionalmente a ele.

4.3 Potência do sistema de geração eólica

A Figura 36 ilustra a potência que sai do CLR e é fornecida à rede elétrica. A partir dela, observa-se o comportamento da potência ativa enviada à rede elétrica, que pode ser dividido em 5 etapas.

Figura 36 – Potência fornecida à rede elétrica



Fonte: O autor.

A primeira etapa pode ser observada entre 0 s e 0,5 s, em que se verifica uma pequena oscilação negativa na potência. Isso ocorre devido ao aumento da tensão elétrica no barramento CC, ou seja, o barramento CC está consumindo corrente elétrica vinda da rede elétrica. A medida que a tensão elétrica do barramento CC se aproxima de 500 V, a corrente elétrica consumida da rede elétrica diminui, o que vai ocasionando uma diminuição de potência consumida da rede elétrica, fazendo com que a potência aproxime-se de zero quando o instante de tempo se aproxima de 0,5 s, de modo que a potência da rede elétrica trocada com o capacitor do barramento CC é mantida em zero quando a tensão do barramento CC se estabiliza em 500 V.

A segunda etapa pode ser observada entre 0,5 s e 0,6 s, em que constata-se que a potência se torna negativa novamente, com um valor bem maior que na primeira etapa. Isso ocorre devido o acionamento do controle de tensão elétrica do barramento CC, que gera um aumento da tensão elétrica do barramento CC a partir de uma rampa de tensão aplicada no instante de tempo de 0,5 s e 0,6 s, até que a tensão elétrica do barramento CC atinja o valor de 800 V. Dessa forma, essa rampa de tensão aplicada pelo controle de tensão elétrica do barramento CC está realizando o carregamento do barramento CC, fazendo a tensão elétrica do barramento atingir 800 V, e para isso está consumindo energia vinda da rede elétrica.

Na terceira etapa, entre 0,6 s e 4,0 s, observa-se que a potência ativa enviada à rede elétrica durante essa etapa é mantida em 0 kW. Isso ocorre devido o barramento CC estar com a tensão elétrica estabilizada em 800 V, e durante essa etapa ele está magnetizando o gerador, não consumindo corrente elétrica da rede elétrica. Como essa etapa é dedicada à magnetização do gerador, este ainda não injeta potência elétrica na rede elétrica, fazendo com que a potência ativa fornecida à rede elétrica durante essa etapa mantenha-se em 0 kW.

Na quarta etapa, entre 4,0 s e 4,5 s, verifica-se que a potência ativa enviada à rede elétrica durante essa etapa varia, em uma função rampa, de 0 kW a aproximadamente 10 kW. Isso ocorre devido a aplicação de uma rampa de potência do gerador, ou seja, entre 4,0 s e 4,5 s o gerador envia uma potência crescente, em uma função rampa, e a potência ativa fornecida à rede elétrica nesse momento varia de de 0 kW a aproximadamente 10 kW. A potência ativa fornecida à rede elétrica não alcança o valor de potência fornecida pelo gerador, ou seja, não atinge 10 kW, e isso ocorre devido as perdas por chaveamento do conversor e as perdas do sistema.

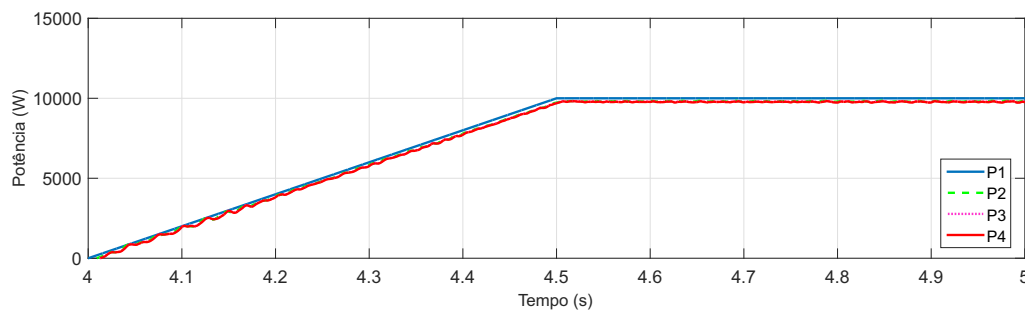
Durante a quinta etapa, entre 4,5 s e 5,0 s, observa-se que a potência ativa enviada à rede elétrica durante essa etapa é mantida constante em aproximadamente 10 kW. Isso ocorre devido a potência fornecida pelo gerador já ter alcançado 10 kW e ter se estabilizado. Assim, a

potência fornecida à rede elétrica se estabiliza, a partir de 4,5 s, em aproximadamente 10 kW.

As Figuras 37 e 38 ilustram um comparativo das potências do sistema, em que a Figura 37 mostra o comportamento das potências desde o momento que o gerador começa a entregar potência à rede elétrica, e 38 mostra o comportamento das potências de 4,95 s a 5,0 s, a fim de possibilitar a observação dos valores das potências nesse intervalo.

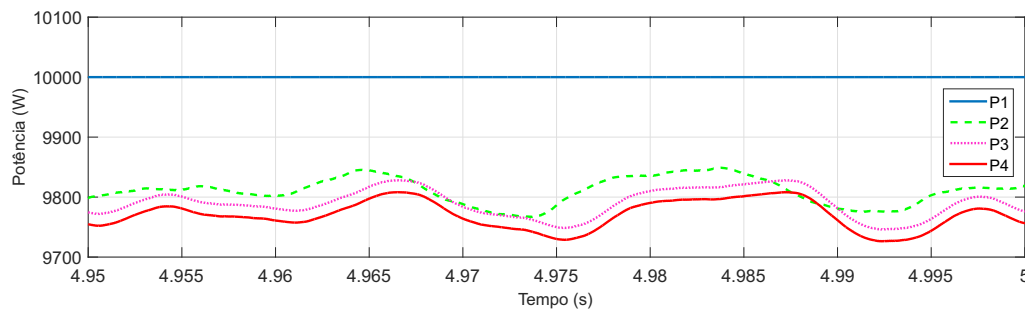
Nas Figuras 37 e 38, P1 é a potência gerada pelo gerador, P2 é a potência que chega ao CLG, P3 é a potência que chega ao CLR, e P4 é a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica.

Figura 37 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema



Fonte: O autor.

Figura 38 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema entre 4,95 s a 5,0 s



Fonte: O autor.

A partir da Figura 37, observa-se que as potências seguem um mesmo trajeto, e são próximas, no entanto não são iguais, mostrando que a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica não é a mesma que é gerada pelo gerador.

A partir da Figura 38 é possível verificar a diferença dos valores das potências. Percebe-se que os valores de potência vão decaindo durante o percurso do sistema, e isso é justificado pela perda de potência devido as perdas por chaveamento do conversor e as perdas do sistema.

A potência que chega ao CLG é menor que a potência gerada pelo gerador. Isso indica que houve uma perda de potência entre o gerador e o CLG, e essa perda foi de aproximadamente 0,2 kW.

A potência que chega ao CLR é menor que a potência que chega ao CLG. Isso indica que houve outra perda de potência, agora entre o CLG e o CLR. Nota-se, no entanto, que a perda existente entre o CLG e o CLR é bem menor que a perda existente entre o gerador e o CLG.

Observa-se ainda que a potência que sai do CLR em direção a rede elétrica é menor que a potência que chega ao CLR. Isso indica que houve mais uma perda de potência, decorrente de perda de chaveamento do CLR.

Nota-se que a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica é de 9,75 kW. Dessa forma, comparando a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica com a potência gerada pelo gerador, constata-se que houve uma perda de potência de aproximadamente 0,25 kW no percurso da potência entregue ao sistema elétrico.

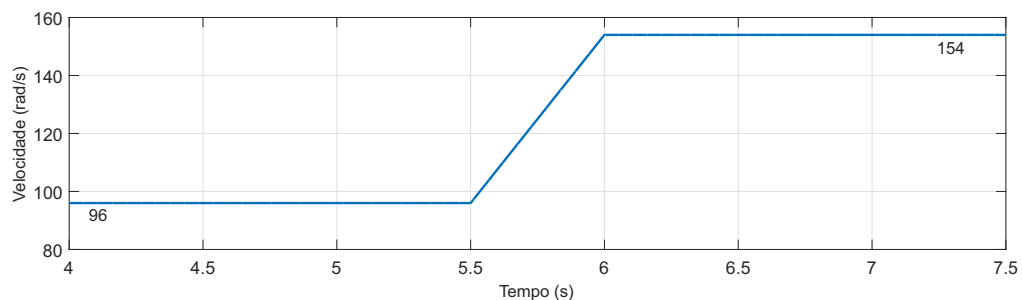
4.4 Simulação do sistema de geração eólica proposto com velocidade variável

Os resultados desta seção foram obtidos através de simulações para verificar o desempenho das estratégias de controle propostas com velocidade variável.

As simulações foram divididas seguindo a mesma organização das simulações em velocidade constante, analisando o sistema de controle do CLR, o sistema de controle do CLR e as potências do sistema.

Durante a operação do sistema de geração eólica com velocidade variável, considera-se que o gerador opera com velocidade de 96 rad/s e 154 rad/s, de acordo com a Figura 39.

Figura 39 – Rampa de velocidade do rotor do GIGE de 96 rad/s a 154 rad/s

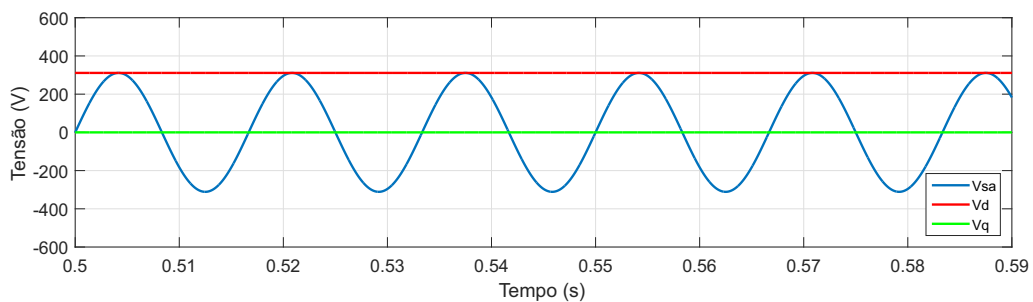


Fonte: O autor.

4.4.1 Resultados do sistema de geração eólica com velocidade variável para o controle do CLR

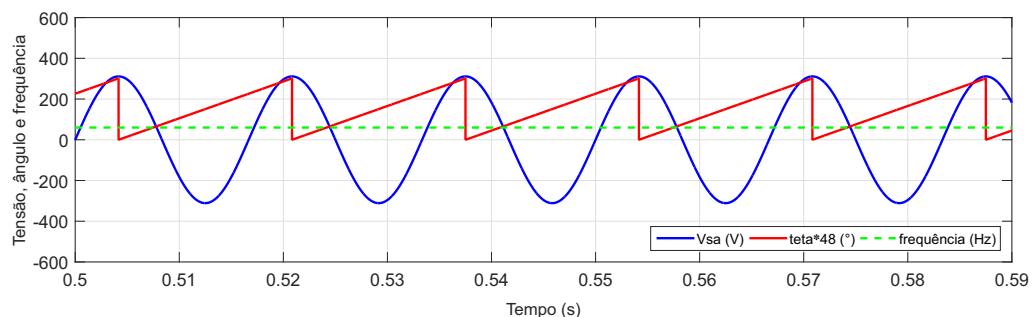
As Figuras 40 e 41 mostram os resultados do PLL para sistema de geração eólica com velocidade variável. Observa-se que os resultados são idênticos aos obtidos quando o sistema operava com velocidade constante de 190 rad/s.

Figura 40 – Tensão da rede elétrica V_{sa} e tensões V_d e V_q obtidas a partir do PLL



Fonte: O autor.

Figura 41 – Tensão da rede elétrica V_{sa} , frequência da rede elétrica e ângulo teta (θ) obtido a partir do PLL

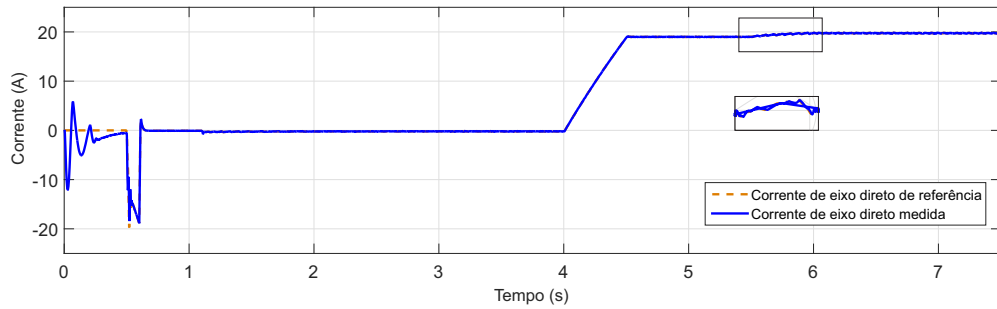


Fonte: O autor.

As Figuras 42 e 43 mostram as respostas das malhas de controle das correntes do CLR, i_d e i_q , seguindo as suas referências, i_{dref} e i_{qref} . Observa-se ainda que i_d tem uma leve oscilação no momento que a velocidade varia, tendo um pequeno aumento no seu valor quando a velocidade aumenta. Além disso, observa-se que i_q se mantém em zero, como na velocidade constante.

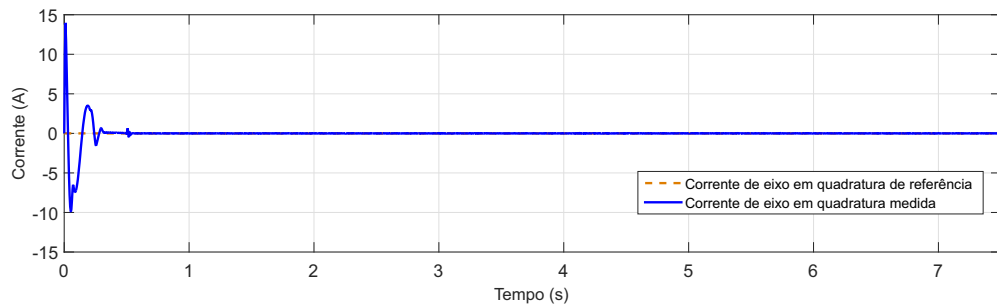
A Figura 44 ilustra a tensão de referência do barramento CC e a tensão medida no barramento CC. Verifica-se que a resposta do controle de tensão do barramento CC mantém-se estável e regulada em 800 V mesmo com a variação de velocidade do gerador elétrico.

Figura 42 – Corrente de eixo direto de referência e corrente de eixo direto medida



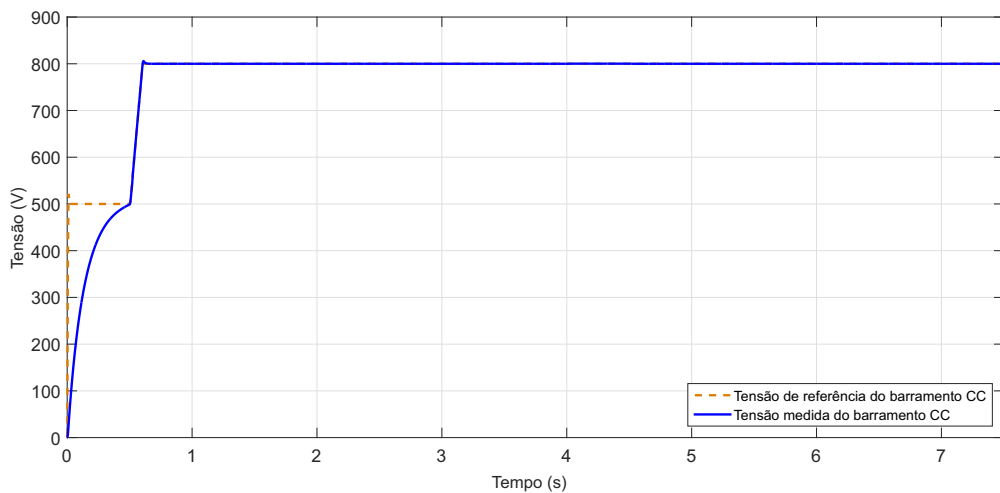
Fonte: O autor.

Figura 43 – Corrente de eixo em quadratura de referência e corrente de eixo em quadratura medida



Fonte: O autor.

Figura 44 – Tensão de referência do barramento CC e tensão medida no barramento CC



Fonte: O autor.

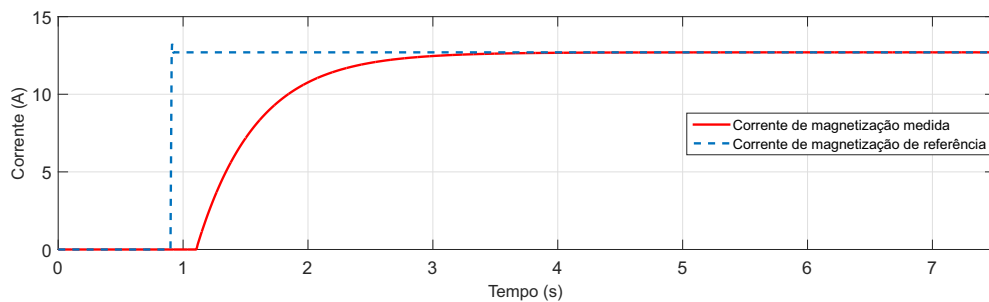
4.4.2 Resultados do sistema de geração eólica com velocidade variável para o controle do CLG

A Figura 45 ilustra a corrente de magnetização medida do gerador e sua referência. A resposta do controle de corrente de magnetização mantém-se igual a obtida para o sistema

de geração eólica operando em velocidade constante na Figura 32, o que comprova o bom funcionamento do controle para velocidade variável.

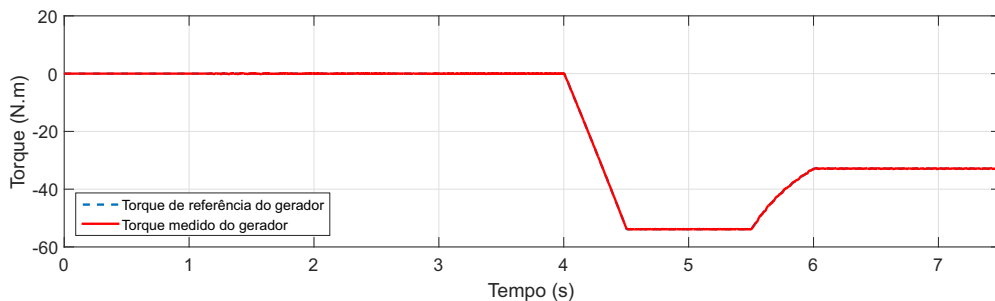
A Figura 46 mostra o torque medido do gerador e sua referência para o sistema com velocidade variável. De acordo com a Equação (3.91), o torque está relacionado com a velocidade de operação do gerador, o que faz com que o torque varie de acordo com a variação da velocidade do gerador.

Figura 45 – Corrente de magnetização de referência e corrente de magnetização medida do gerador



Fonte: O autor.

Figura 46 – Torque de referência e torque medido do gerador



Fonte: O autor.

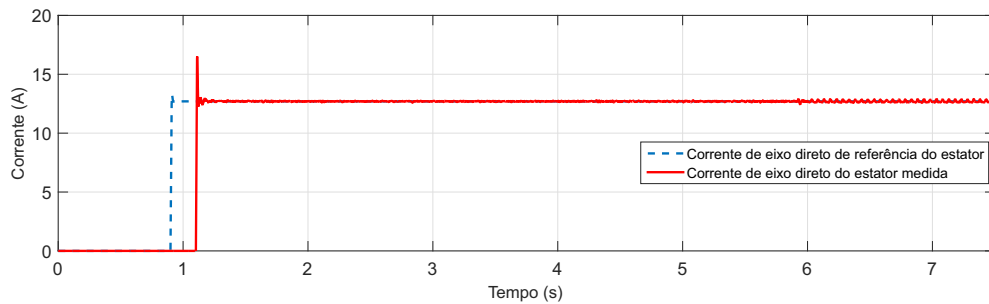
A potência de referência do gerador foi aplicada no instante $t=4,0$ s, sendo aplicada uma função em rampa de potência ativa de referência no valor de 0 kW a -10 kW, enquanto o gerador opera a uma velocidade angular mecânica do rotor de 96 rad/s. Nesse momento, de 4,0 s a 4,5 s, enquanto a potência varia de 0 kW a -10 kW e a velocidade do gerador é 96 rad/s, o valor do torque varia de 0 N.m a -52,10 N.m, mantendo esse valor de torque até 5,5 s.

No intervalo de tempo de 5,5 s a 6,0 s ocorre a variação de velocidade do gerador de 96 rad/s a 154 rad/s. Nesse momento, o torque varia seu valor, indo de -52,10 N.m para -32,50 N.m. A partir de 6,0 s, o gerador opera com velocidade de 154 rad/s, e o torque se mantém em -32,50 N.m. Além disso, observa-se que em todo o tempo de operação do sistema o torque segue

a sua referência, o que comprova o bom desempenho do controle.

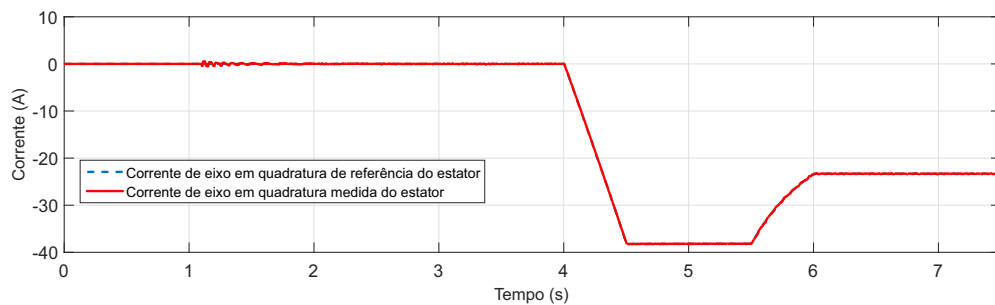
As Figuras 47 e 48 mostram as respostas das malhas de controle das correntes do CLG, i_{ed} e i_{eq} , seguindo as suas referências, i_{edref} e i_{eqref} .

Figura 47 – Corrente de eixo direto de referência do estator e corrente de eixo direto do estator medida



Fonte: O autor.

Figura 48 – Corrente de eixo em quadratura de referência do estator e corrente de eixo em quadratura medida do estator



Fonte: O autor.

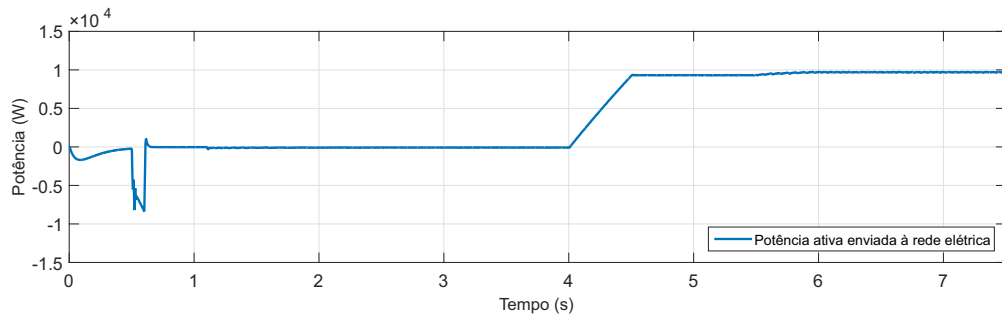
Verifica-se i_{eq} é modificada de acordo com a velocidade de operação do sistema, e isso é justificado, já que i_{eq} está diretamente relacionada com o torque do gerador, que também varia de acordo com a velocidade de operação do sistema. Assim, com a variação na velocidade de operação do sistema, o valor do torque varia, acarretando a variação de i_{eq} , como mostrado na Figura 20. Observa-se ainda que i_{ed} apresenta o mesmo valor que apresentou para velocidade constante.

4.4.3 Potência do sistema de geração eólica com velocidade variável

A Figura 49 ilustra a potência que sai do CLR e é fornecida à rede elétrica para o sistema de geração eólica com velocidade variável. Observa-se o comportamento da potência ativa enviada à rede elétrica com a velocidade variável é o mesmo mostrado na Figura 36, com

velocidade constante, possuindo as mesmas 5 etapas.

Figura 49 – Potência fornecida à rede elétrica



Fonte: O autor.

As Figuras 50, 51, 52 e 53 ilustram um comparativo das potências do sistema.

Nas Figuras 50, 51, 52 e 53, P1 é a potência gerada pelo gerador, P2 é a potência que chega ao CLG, P3 é a potência que chega ao CLR, e P4 é a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica.

A Figura 50 mostra o comportamento das potências desde o momento que o gerador começa a gerar potência. Observa-se que as potências seguem um mesmo trajeto, e são próximas, no entanto são diferentes. Dessa forma, a fim de possibilitar a observação da diferença dos valores das potências durante a operação do sistema, as Figuras 51, 52 e 53 mostram o comportamento das potências durante a velocidade de 96 rad/s (4,95 s a 5 s), durante a transição de velocidade de 96 rad/s a 154 rad/s (5,5 s a 6 s), e durante a velocidade de 154 rad/s (7,45 s a 7,5 s), respectivamente.

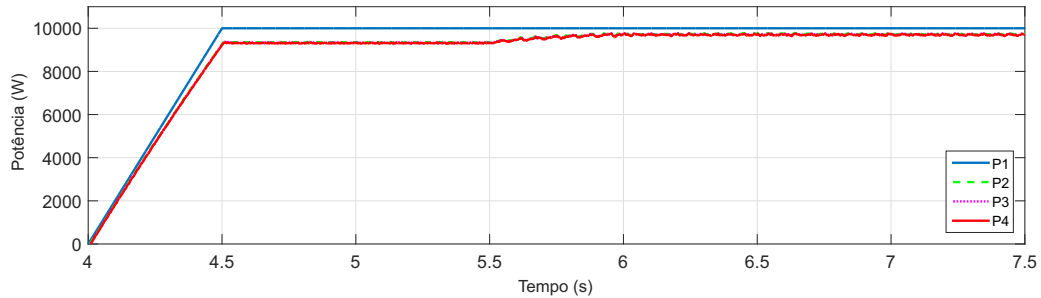
A Figura 51 mostra o comportamento das potências de 4,95 s a 5,0 s. Durante esse intervalo de tempo o sistema está operando com velocidade de 96 rad/s. A potência que alcança o CLG é menor que a potência gerada. Isso indica que houve uma perda de potência entre o gerador e o CLG, e essa perda foi de aproximadamente 0,65 kW.

Verifica-se que a potência que chega ao CLR é menor que a potência que chega ao CLG. Isso indica que houve outra perda de potência, agora entre o CLG e o CLR. Nota-se, no entanto, que a perda existente entre o CLG e o CLR é pequena, e que os valores são bem próximos.

Observa-se ainda que a potência que sai do CLR em direção a rede elétrica é menor que a potência que chega ao CLR. Isso indica que houve mais uma perda de potência, agora do CLR em direção à rede, ou seja, da potência que chega ao CLR em relação a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica.

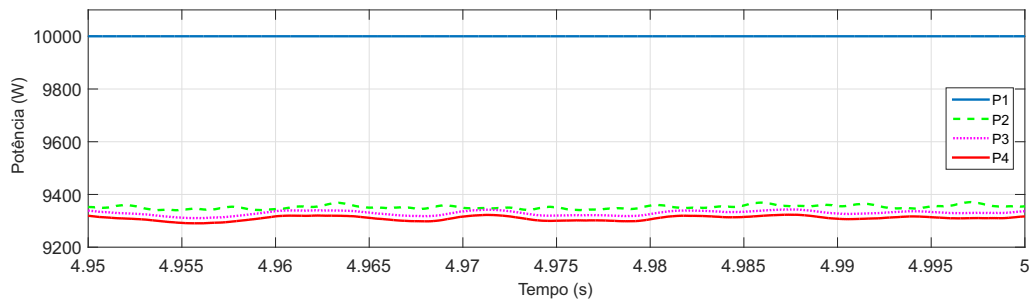
Nota-se que a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica gira em torno de 9,3 kW. Dessa forma, comparando com a potência gerada pelo gerador, observa-se que houve uma perda de potência de aproximadamente 0,7 kW no percurso do sistema.

Figura 50 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema



Fonte: O autor.

Figura 51 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema entre 4,95 s a 5,0 s



Fonte: O autor.

A Figura 52 mostra o comportamento das potências de 5,5 s a 6,0 s. Durante esse intervalo de tempo o sistema está operando com velocidade variando, em função rampa, de 96 rad/s a 154 rad/s. A potência que chega ao CLG é menor que a potência gerada pelo gerador. No entanto, com a variação de velocidade, nota-se que a potência que chega ao CLG vai aumentando, alcançando, aproximadamente, 9,8 kW quando a velocidade chega a 154 rad/s.

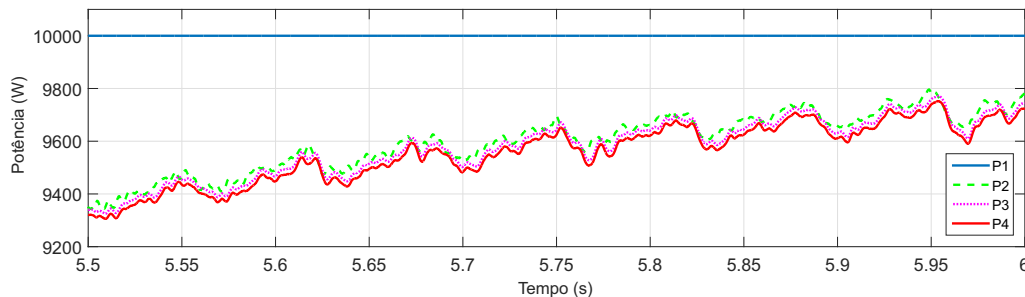
Percebe-se que a potência que chega ao CLR é menor que a potência que sai do CLG. Isso indica que houve outra perda de potência, agora entre o CLG e o CLR. Nota-se, no entanto, que a perda existente entre o CLG e o CLR é pequena, e que os valores são bem próximos. Além disso, verifica-se que, assim como a potência que chega ao CLG, a potência que chega ao CLR também vai crescendo com o aumento da velocidade.

A potência que sai do CLR em direção a rede elétrica é menor que a potência que chega ao CLR. Isso indica que houve perda de potência, agora do CLR em direção à rede, ou seja, da potência que chega ao CLR em relação a potência que sai do CLR em direção à rede

elétrica. Assim como as outras potências, a potência que sai do CLR também vai crescendo com o aumento da velocidade.

Nota-se que a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica gira em torno de 9,3 kW a 9,7 kW durante a variação de velocidade de 96 rad/s a 154 rad/s, mostrando que houve uma perda de potência de aproximadamente 0,7 kW a 0,3 kW durante o intervalo de tempo da variação de velocidade.

Figura 52 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema entre 5,5 s a 6,0 s



Fonte: O autor.

A Figura 53 mostra o comportamento das potências de 7,45 s a 7,5 s. Durante esse intervalo de tempo o sistema está operando com velocidade de 154 rad/s. Observa-se que a potência que chega ao CLG é menor que a potência gerada. Isso indica que houve uma perda de potência entre o gerador e o CLG, e essa perda foi de aproximadamente 0,25 kW.

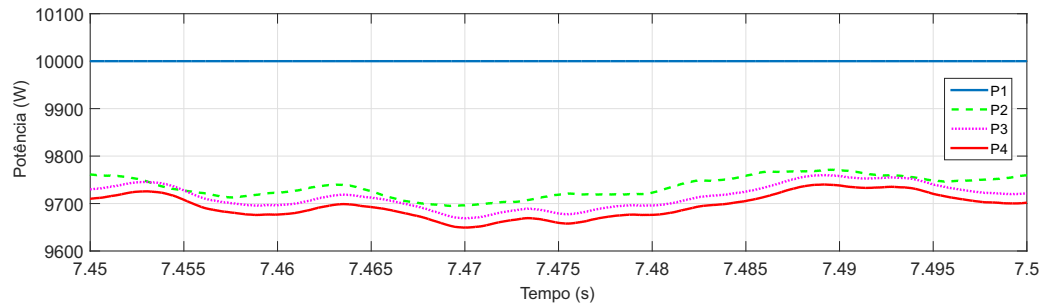
É possível perceber que a potência que chega ao CLR é menor que a potência que chega ao CLG. Isso indica que houve perda de potência, agora entre o CLG e o CLR. Nota-se, no entanto, que a perda existente entre o CLG e o CLR é pequena, e que os valores são bem próximos.

Observa-se ainda que a potência que sai do CLR em direção a rede elétrica é menor que a potência que chega ao CLR. Isso indica que houve perda de potência, agora do CLR em direção à rede, ou seja, da potência que chega ao CLR em relação a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica.

Verifica-se que a potência que sai do CLR em direção à rede elétrica é de 9,7 kW. Dessa forma, comparando com a potência gerada pelo gerador, observa-se que houve uma perda de potência de aproximadamente 0,3 kW no percurso do sistema.

A partir das Figuras 51, 52 e 53 é possível observar a diferença dos valores das potências durante a operação do sistema. Os valores de potência vão decaindo durante o percurso do sistema, e isso é justificado pela perda de potência devido as perdas por chaveamento dos

Figura 53 – Comparação de potências medidas ao longo do sistema entre 6,95 s a 7,0 s



Fonte: O autor.

conversores e as perdas do sistema.

Além disso, constata-se que as potências vão se aproximando do valor da potência fornecida pelo gerador com o aumento da velocidade. Isso mostra que quanto maior a velocidade de operação do gerador, mais próxima a potência entregue a rede será da potência gerada. Isso pode ser observado a partir da Figura 52, que mostra que quanto maior a velocidade do gerador, maior a potência que consegue ser transferida do gerador para a rede, e através da comparação das Figuras 38, 51 e 53, em que na Figura 38 tem-se uma velocidade de 190 rad/s e uma potência entregue à rede de aproximadamente 9,75 kW, na Figura 51 tem-se uma velocidade de 96 rad/s e uma potência entregue à rede de aproximadamente 9,3 kW, e na Figura 53 tem-se uma velocidade de 154 rad/s e uma potência entregue a rede de aproximadamente 9,7 kW.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado um sistema de geração de energia eólica conectado à rede elétrica, em que é utilizado um gerador de indução gaiola de esquilo.

O gerador de indução gaiola de esquilo é atrativo para a aplicação em geração eólica devido a sua robustez e baixo custo, quando comparado a outros geradores. Seu uso tornou-se mais atrativo com o desenvolvimento da eletrônica de potência, que possibilitou seu uso em velocidade variável e uma maior eficiência. Dessa forma, utilizou-se conversores eletrônicos de potência para conectar gerador à rede elétrica, desenvolvendo o controle desses conversores. Foi desenvolvido e apresentado o controle de potências ativa e reativa do sistema com o uso do CLR e CLG, utilizando a modulação por largura de pulso (PWM).

Os resultados das simulações do sistema GIGE conectado à rede elétrica foram apresentados. O desempenho das malhas de controle de corrente elétrica do sistema foi observado e discutido, de modo que se verificou o bom comportamento do controle. Os resultados das simulações da operação do sistema de geração eólica demonstraram o bom desempenho da técnica de controle para o sistema operando em velocidade constante e em velocidade variável.

A partir das simulações foi possível observar o fluxo de potência ativa do sistema, verificando-o em velocidade constante e em velocidade variável. Notou-se que quanto maior a velocidade do sistema (mais próxima da velocidade ótima) menor a perda de potência, e mais próxima a potência ativa entregue à rede elétrica estará da potência gerada. Dessa maneira, as perdas do sistema e as perdas devido chaveamento dos conversores aumentam de acordo com velocidade de operação, ou seja, quanto maior a distância da velocidade de operação para a velocidade ótima do sistema, maiores serão as perdas de potência no sistema.

Notou-se, a partir dos resultados obtidos, que os métodos de controle propostos corresponderam de forma satisfatória e que os compensadores utilizados permitiram bom desempenho do controle, acarretando em um bom comportamento dinâmico do sistema e tornando-o viável para uma implementação prática.

Por fim, o estudo realizado serve como base teórica para a implementação real de um sistema eólico utilizando GIGE. Portanto, espera-se que este trabalho seja apenas o começo de uma série de trabalhos futuros que visem novas propostas de melhorias para o sistema já implementado.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se continuar os estudos:

- Utilizando estratégias de controle que permitam mitigar harmônicas de corrente elétrica;
- Utilizando outras estratégias de controle para comparação das técnicas empregadas;
- Utilizando potências da ordem de MW no sistema;
- Adicionando um sistema avançado de armazenamento ao sistema de geração eólica;
- Utilizando técnicas de controle que permitam controlar o conversor CC/CC conectado ao banco de baterias do sistema de armazenamento.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Brasil já tem mais de 500 parques eólicos**. 2018. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/noticias/brasil-ja-tem-mais-de-500-parques-eolicos/>>.
- ANEEL, A. N. d. E. E. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2008. Disponível em: <<Http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>.
- BATISTA, V. P. J. **Estudo e análise de gerador de indução com rotor gaiola de esquilo conectado à rede elétrica com emprego do filtro LCL aplicado em sistema de geração eólica**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do ABC, Santo André, 2013.
- BEZERRA, P. A. M. **ANÁLISE TEÓRICA E SIMULAÇÕES DE UM AEROGERADOR SÍNCRONO DE VELOCIDADE VARIÁVEL UTILIZANDO CONTROLE VETORIAL**. 2010. 117 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamento**. [S.l.]: Campus, 2009. S.l.
- BURTON T.; D. SHARPE, N. J. E. B. **Wind energy handbook**. [S.l.]: John Wiley Sons - Ltd, 2001. S.l.
- CHEN Z.; GUERRERO, J. M. B. F. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 8, p. 1859–1875., 2009.
- CRESESB, C. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. [S.l.: s.n.], 2002. S.l.
- DOMÍNGUEZ-GARCÍA J. L.; GOMIS-BELLMUNT, O. T.-R. L. J.-F. Vector control of squirrel cage induction generator for wind power. *IEEE. Electrical Machines (ICEM)*, 2010 XIX International Conference on., 2010.
- DOMÍNGUEZ-GARCÍA J. L.; GOMIS-BELLMUNT, O. T.-R. L. J.-F. A. Indirect vector control of a squirrel cage induction generator wind turbine. *Computers Mathematics with Applications*., 2012.
- EDJTAHED S.; KARRARI, M. R.-W. M. O. Nonlinear state space modeling of a variable speed wind power generation system. 2006 *IEEE Power Engineering Society General Meeting*., 2006.
- FITZGERALD A. E.; KINGSLEY, C. U. S. D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006. S.l.
- HEYDARI M.; VARJANI, A. Y. M. M. A novel variable-speed wind energy system using induction generator and six-switch ac/ac converter. 2012 *3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC)*., 2012.
- KRAUSE P. C.; WASYNCZUK, O. S. S. D. P. S. **Analysis of electric machinery and drive systems**. [S.l.]: John Wiley Sons, 2013. S.l.
- LIPO, T. A. **Vector control and dynamics of AC drives**. [S.l.]: Oxford university press, 1996. S.l.

MARTINS, G. S. **TÉCNICAS DE CONTROLE DE POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA UTILIZANDO GERADOR DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO APLICADO A UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA.** 2018. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

MOREIRA, A. B. **PROPOSTAS DE CONTROLE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE ENERGIA EÓLICA COM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO COM MITIGAÇÃO DE CORRENTES HARMÔNICAS NA REDE ELÉTRICA GERADAS POR CARGA NÃO LINEAR.** 2017. 156 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

MUTSCHLER P.; HOFFINANN, R. Comparison of wind turbines regarding their energy generation. IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, v. 1, Cairns, Qld., Australia, 2002.

NETO, A. S. **ANÁLISE E CONTROLE DE CENTRAIS EÓLICAS A VELOCIDADE VARIÁVEL UTILIZANDO ATPDRAW.** 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno.** [S.l.]: Pearson, 2011. v. 5ª edição.

PINTO, M. d. O. **Fundamentos de energia eólica.** [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2013. S.l.

REIS, J. M. V. d. S. **COMPORTAMENTO DOS GERADORES EÓLICOS SÍNCRONOS COM CONVERSORES DIANTE DE CURTO-CIRCUITOS NO SISTEMA.** Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

SARMENTO, T. F. **Estudo do controle de potências ativa e reativa de geradores de indução duplamente alimentados com aplicação na geração eólica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

SLEMON, G. R. **Electric Machines and Drives.** [S.l.]: Addison-Wesley Publishing Company, 1992. S.l.

SOARES, M. N. **PROJETO DE CONTROLADORES PI PARA ACIONAMENTO VETORIAL DE MÁQUINAS DE INDUÇÃO.** 2015. 105 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SUEBKINORN W. ; NEAMMANEE, B. An implementation of field oriented controlled scig for variable speed wind turbine. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications., 2011.

VOLTOLINI, H. **Modelagem e Controle de Geradores de Indução Duplamente Alimentados com Aplicação em Sistemas Eólicos.** Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2007.

YAZDANI, A.; IRAVANI, R. **Voltage-sourced converters in power systems : modeling, control, and applications.** [S.l.]: John Wiley Sons, 2010. S.l.

APÊNDICE A – PARÂMETROS UTILIZADOS NO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA

Tabela 1 – Parâmetros da máquina de indução.

Variáveis	Valores
Potência nominal	15000 W
Tensão nominal	460 V
Frequência nominal	60 Hz
Par de polos	2
R_e	0,2761 Ω
R_r	0,1645 Ω
L_e	0,0783 H
L_r	0,0783 H
L_m	0,07614 H
L_{le}	0,002191 H
L_{lr}	0,002191 H
σ_e	0,028776
σ_r	0,02877
σ	0,0552
τ_e	0,2837 s
τ_r	0,4762 s
τ_i	1 ms

Tabela 2 – Parâmetros do conversor de potência Back to Back.

Variáveis	Valores
Capacitância do barramento CC	3500 μF
Tensão barramento CC	800 V
Frequência de chaveamento do PWM do CLR e CLG	10000 Hz
Chave utilizada	Ideal - IGBT

Tabela 3 – Parâmetros do lado da rede elétrica.

Variáveis	Valores
Tensão da rede elétrica linha-linha	380 V
Frequência da rede elétrica	60 Hz
Resistência	0,8 Ω
Indutância	6 mH

APÊNDICE B – SISTEMA DE CONTROLE DO CLR

As Figuras 54, 55 e 56 mostram os blocos utilizados no controle do CLR.

Figura 54 – PLL implementado no software MatLab/Simulink.

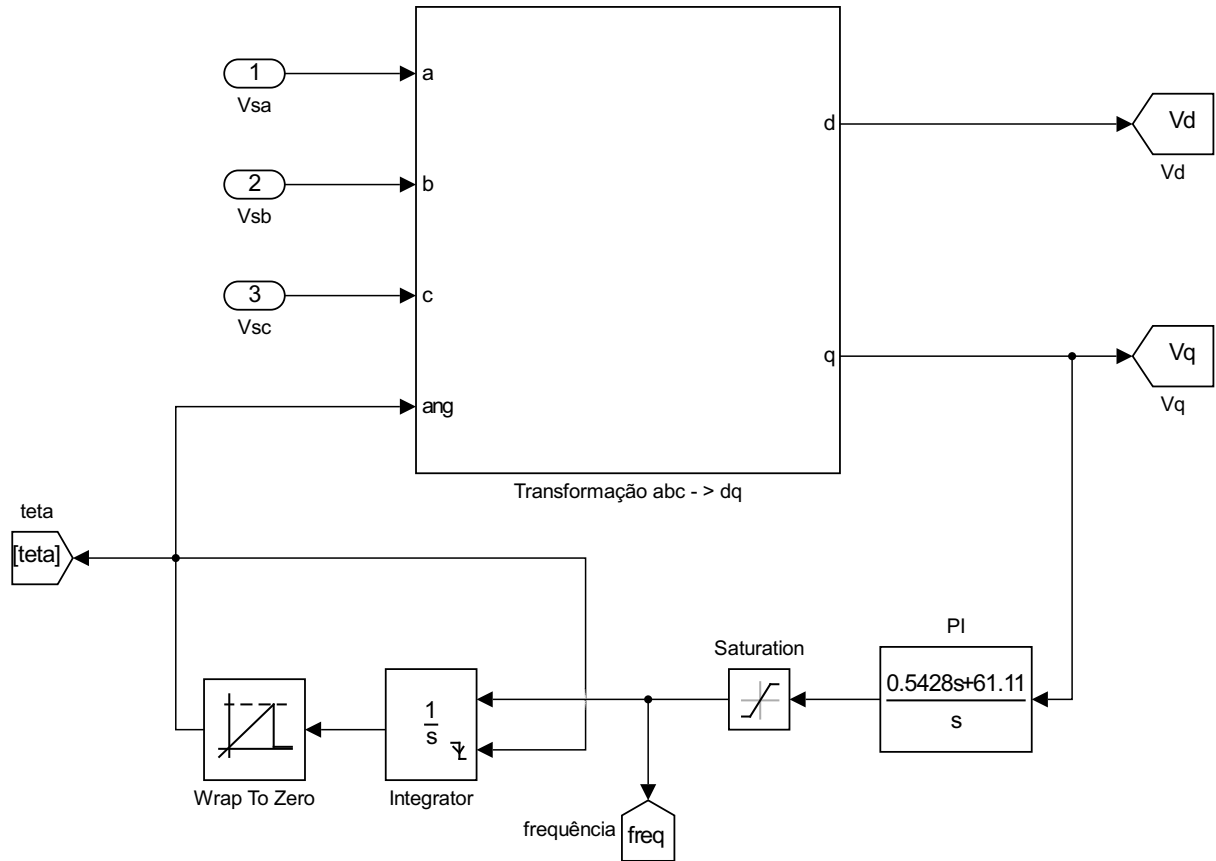


Figura 55 – Sistema de controle de corrente do CLR implementado no software MatLab/Simulink.

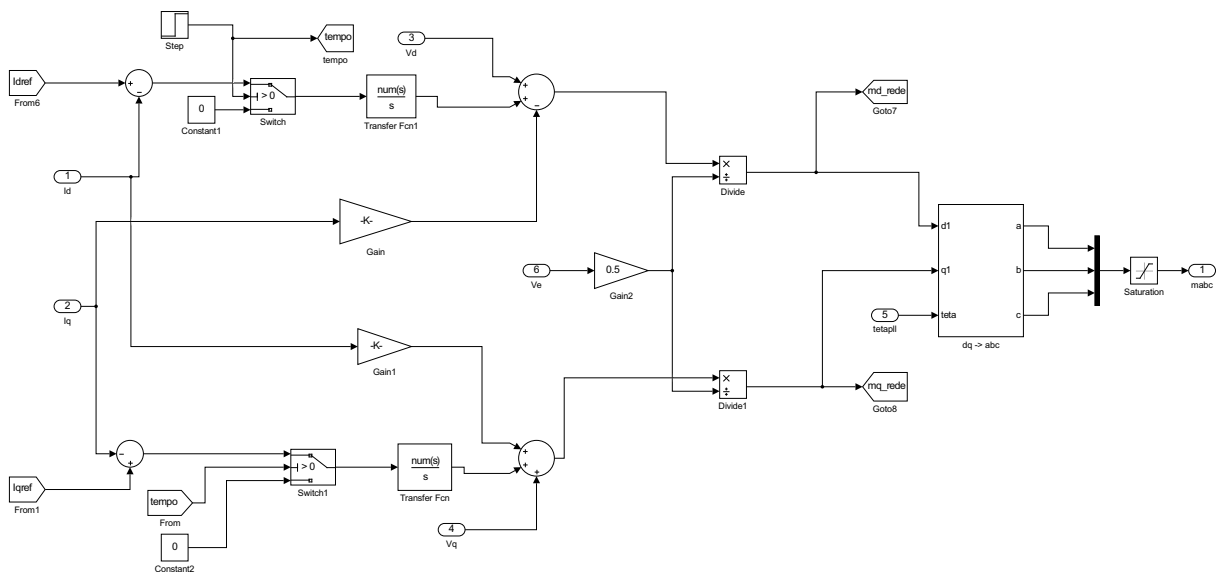
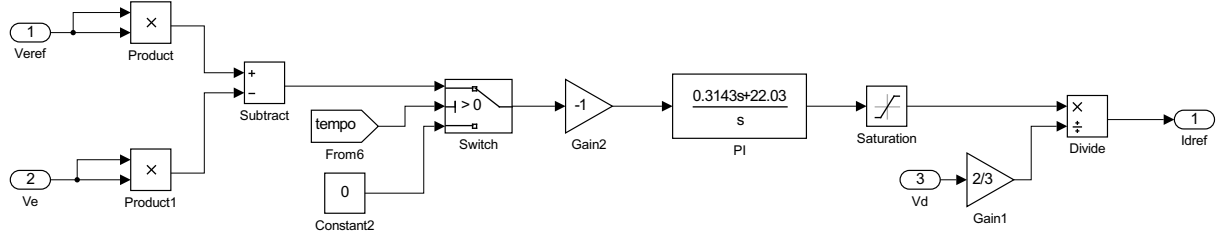


Figura 56 – Controle de tensão do barramento CC implementado no software MatLab/Simulink.



APÊNDICE C – SISTEMA DE CONTROLE DO CLG

As Figuras 57, 58 e 59 mostram os blocos utilizados no controle do CLG.

Figura 57 – Observador de fluxo implementado no software MatLab/Simulink.

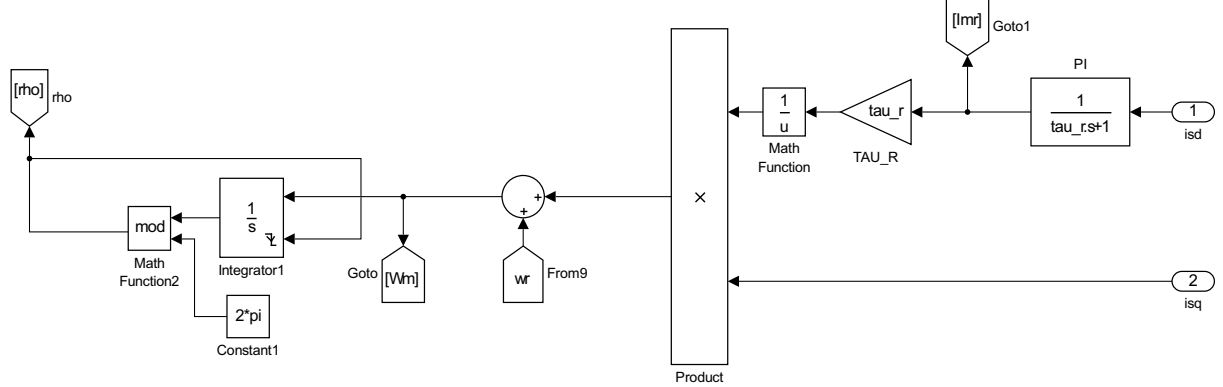


Figura 58 – Controle vetorial implementado no software MatLab/Simulink.

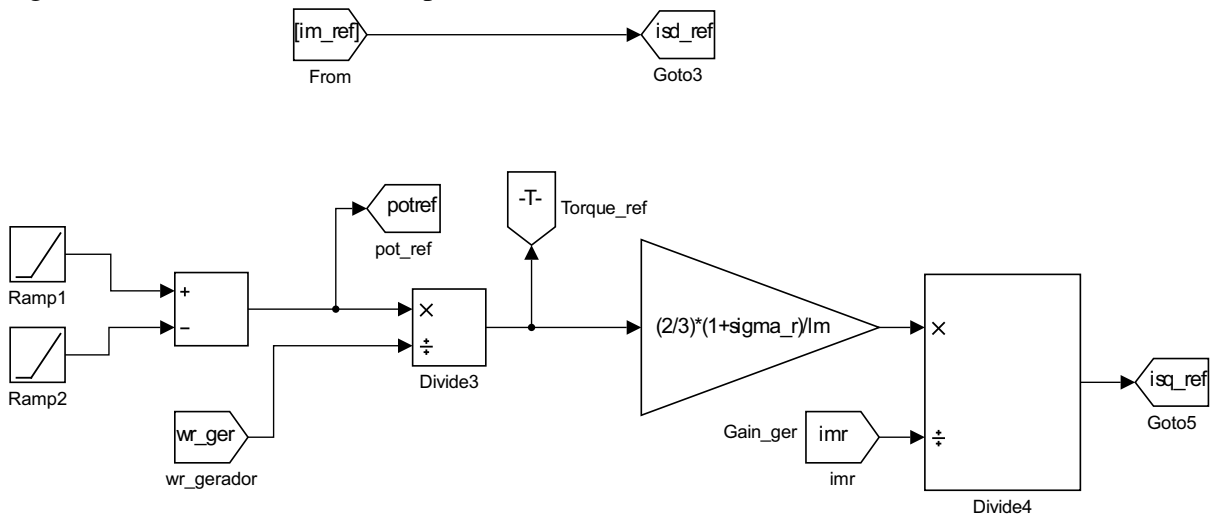


Figura 59 – Sistema de controle de corrente do CLG implementado no software MatLab/Simulink.

