

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

JEAN PATRICK PRIGOL

**CONTROLE DE GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE
ALIMENTADO PARA AUXÍLIO NA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM
REDE RURAL**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2017

JEAN PATRICK PRIGOL

**CONTROLE DE GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE
ALIMENTADO PARA AUXÍLIO NA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM
REDE RURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Sistemas e Processamento de Energia.

Orientador: Dr. Jean Patric da Costa

PATO BRANCO

2017

P951c Prigol, Jean Patrick.
Controle de gerador de indução duplamente alimentado para auxílio na
regulação de tensão em rede rural / Jean Patrick Prigol. -- 2017.
96 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Jean Patric da Costa
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Pato Branco, PR,
2016.
Bibliografia: f. 87 – 90.

1. Redes elétricas. 2. Energia elétrica - Qualidade. 3. Máquinas elétricas
de indução. I. Costa, Jean Patric da, orient. II. Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
III. Título.

CDD 22. ed. 621.3

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Pato Branco
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n° 054

“Controle de Gerador de Indução Duplamente Alimentado para Auxílio na Regulação de Tensão em Rede Rural”

por

Jean Patrick Prigol

Dissertação apresentada às oito horas e trinta minutos do dia vinte e seis de maio de dois mil e dezessete, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Área de Concentração: Sistemas e Processamento de Energia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jean Patric da Costa
UTFPR/PB (Orientador)

Prof. Dr. Cesar Rafael Claire Torrico
UTFPR/PB

Prof. Dr. Ivan Jorge Gabe
IFRS/RS

Prof. Dr. Rafael Cardoso
UTFPR/PB

Prof. Dr. Gustavo Weber Denardin
Coordenador Substituto do PPGE

A via original, devidamente assinada, encontra-se na Biblioteca da UTFPR – Câmpus Pato Branco.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e fé que estiveram fortemente presentes.

Agradeço a minha família, em especial a minha esposa Tatiane pelo total apoio, paciência, amor e confiança em mim depositados, a você minha gratidão.

Um agradecimento também aos professores do colegiado, ao meu orientador Dr. Jean Patric da Costa pela sabedoria, dedicação e transparência em toda a trajetória.

Ao compadre Renato pelo incentivo em fazer este mestrado e ao compadre Odilio pelos incontáveis buracos superados nas idas e vindas a Pato Branco.

Por fim agradeço a todos os colegas de mestrado que de alguma forma ou de outra participaram desta caminhada na busca do aperfeiçoamento constante.

“O mais competente não discute, domina a sua ciência e cala-se.”

(Voltaire)

RESUMO

PRIGOL, Jean Patrick. CONTROLE DE GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO PARA AUXÍLIO NA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDE RURAL. 96 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho apresenta o controle de potência em um gerador de indução duplamente alimentado (GIDA) utilizado em uma micro turbina eólica, visando o controle de potência ativa e reativa para minimizar as variações de tensão em redes rurais. Com a inserção destas fontes renováveis de energia no sistema de distribuição em baixa tensão, é fundamental analisar os impactos na qualidade de energia no ponto de conexão (PC) e implementar o controle adequado para atender os requisitos técnicos dos procedimentos de distribuição estabelecidos por norma. Uma equação é apresentada para relacionar a variação de tensão com a potência injetada em uma rede de distribuição em baixa tensão. Uma rede rural típica é emulada nesse trabalho para analisar este impacto na variação de tensão em áreas remotas. O sistema utiliza malhas de controle tradicionais PI para as correntes rotóricas e malha de potência ativa e reativa, e as referências são então definidas para auxiliar a evitar uma violação da banda de variação de tensão permitida por norma. Devido ao fato de que a inserção de potência ativa em redes rurais é o principal fator de variação da tensão no PC, resultados experimentais são apresentados para validar a teoria desenvolvida e comprovar a eficácia do sistema projetado.

Palavras-chave: Controle, tensão, GIDA, rede rural, qualidade de energia.

ABSTRACT

PRIGOL, Jean Patrick. CONTROL OF DOUBLE FED INDUCTION GENERATOR TO AID IN VOLTAGE REGULATION IN RURAL NETWORK. 96 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

This work presents the power control in a double fed induction generator (DFIG) used in a wind turbine, aiming the control of active and reactive power to minimize the voltage variations in rural networks. With the insertion of these renewable energy sources in the low voltage distribution system, it is fundamental to analyze the impacts on the quality of energy at the point of connection (PC) and to implement adequate control to attend the technical requirements of the distribution procedures established by standard. An equation is presented to relate the voltage variation to the injected power in a low voltage distribution network. A typical rural network is emulated in this work to analyze this impact on the voltage variation in remote areas. The system uses traditional PI control meshes for rotor currents and active and reactive power mesh, and the references are then set to help prevent a violation of the allowable voltage variation band as per standard. Due to the fact that the insertion of active power in rural networks is the main factor of variation of the voltage in the PC, experimental results are presented to validate the developed theory and to prove the efficiency of the designed system.

Keywords: Control, voltage, DFIG, weak network, power quality.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Visão geral do GIDA.	15
FIGURA 2	– Característica de potência da turbina com β constante.	23
FIGURA 3	– Conversor <i>back-to-back</i>	25
FIGURA 4	– Formas de onda da corrente para diferentes valores de p	28
FIGURA 5	– Formas de onda para corrente e tensão na saída do inversor.	29
FIGURA 6	– Variação de tensão para PC abaixo de 1kV.	33
FIGURA 7	– Modelo da rede rural.	35
FIGURA 8	– Ângulo ao longo da rede.	35
FIGURA 9	– Análise da variação de tensão no PC.	36
FIGURA 10	– Convenção dos sinais para as potências.	37
FIGURA 11	– Característica da variação da tensão em função da potência.	38
FIGURA 12	– Variação da tensão em função da potência gerada e carga no PC.	38
FIGURA 13	– Transformação em eixos síncronos.	40
FIGURA 14	– Circuito elétrico equivalente do GIDA.	42
FIGURA 15	– Referencial do fluxo estatórico para as variáveis do rotor e estator.	47
FIGURA 16	– Curva de capacidade da micro turbina eólica equipada com GIDA.	51
FIGURA 17	– Determinação do ganho da malha de controle de potência ativa.	56
FIGURA 18	– Diagrama de blocos do sistema proposto.	57
FIGURA 19	– Circuito GSC com o filtro L.	58
FIGURA 20	– Diagrama de bloco de controle de corrente i_{qdGSC}	59
FIGURA 21	– Diagrama de bloco controle de tensão do barramento CC.	59
FIGURA 22	– Análise malha de corrente do GSC.	60
FIGURA 23	– Análise da malha de tensão do GSC.	60
FIGURA 24	– Simulação GSC.	61
FIGURA 25	– Diagrama de controle geral.	63
FIGURA 26	– Diagrama para o PLL.	64
FIGURA 27	– Diagrama simplificado do sistema.	65
FIGURA 28	– Inicialização do barramento CC.	66
FIGURA 29	– Corrente de magnetização através do RSC e corrente no GSC para o barramento carregado a 350 V _{cc}	68
FIGURA 30	– Consumo durante operação barramento CC.	69
FIGURA 31	– Correntes rotóricas durante transição de velocidade do sub para a sobre síncrona.	69
FIGURA 32	– Conexão a 1440 rpm com FP unitário.	71
FIGURA 33	– Medições a 1800 rpm com FP=0,95 indutivo.	72
FIGURA 34	– Medições com FP=0,92 indutivo.	73
FIGURA 35	– Conexão a 1440 rpm com FP unitário em rede rural.	74
FIGURA 36	– Conexão e geração a 1440 rpm com FP unitário em rede rural.	74
FIGURA 37	– Medições com FP unitário na velocidade síncrona $P_s^* = -1290W$	75
FIGURA 38	– Medições com FP unitário na velocidade sobre síncrona $P_s^* = -1920W$. .	75
FIGURA 39	– Medições com FP=0,96 indutivo.	77
FIGURA 40	– Medições com FP=0,92 indutivo.	78

FIGURA 41	–	Medições com FP=0,87 indutivo.	79
FIGURA 42	–	Medições com FP=0,58 indutivo.	80
FIGURA 43	–	Variação de tensão no PC.	81
FIGURA 44	–	Tensão no PC e GSC carregando barramento CC.	82
FIGURA 45	–	Tensão no PC com carga e diferentes i_{qGSC}^*	83
FIGURA 46	–	Variação de tensão no PC com carga e diferentes i_{qGSC}^*	83
FIGURA 47	–	Conjunto motor de indução e gerador duplamente alimentado.	91
FIGURA 48	–	Piccolo F28069.	92
FIGURA 49	–	Placa de isolamento DSP-driver.	94
FIGURA 50	–	Placa eletrônica desenvolvida para interface entre <i>encoder</i> e DSP.	94
FIGURA 51	–	Painel de comando e controle.	95
FIGURA 52	–	Rede rural formada pelo reostato e indutores.	96
FIGURA 53	–	Visão geral da montagem da plataforma experimental.	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Capacidade instalada a nível mundial	14
TABELA 2	– Evolução das turbinas eólicas	19
TABELA 3	– Controle de velocidade e geradores	19
TABELA 4	– Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental). .	33
TABELA 5	– Parâmetros controlador PID pelo método de <i>Ziegler-Nichols</i> a malha aberta.	56
TABELA 6	– Tabela de MPPT para os pontos de operação analisados.	70
TABELA 7	– Parâmetros do GIDA	92
TABELA 8	– Parâmetros gerais	93

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DTT%	Distorção harmônica total de tensão
FP	Fator de Potência
GD	Geração Distribuída
GIDA	Gerador de Indução Duplamente Alimentado
GSC	<i>Grid side converter</i> - Conversor do lado da rede
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MPPT	<i>Maximum power point tracking</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OSIG	<i>Opti-slip Induction Generator</i>
PC	Ponto de conexão
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> - Gerador síncrono com ímã permanente
PRODIST	Procedimentos de distribuição
PROREDE	Procedimentos de rede
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por largura de pulso
RSC	<i>Rotor side converter</i> - Conversor do lado do rotor
SCIG	<i>Squirrel Cage Induction Generator</i> - Gerador de indução tipo gaiola de esquilo
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SHE	<i>Selective Harmonic Elimination</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SVM	<i>Space Vector Modulation</i>
VR	Valor de referência
WRIG	<i>Wound Rotor Induction Generator</i> - Gerador de indução com rotor bobinado
WRSG	<i>Wound Rotor Synchronous Generator</i> - Gerador síncrono com rotor bobinado

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Ângulo de passo
λ	Razão máxima de velocidade
ω	Velocidade Rotacional
ω_e	Velocidade angular do fluxo estatórico
ω_m	Velocidade mecânica angular do gerador
ω_r	Velocidade angular do rotor
ω_s	Velocidade angular síncrona do estator
θ_e	Posição do fluxo estatórico
φ	Ângulo entre corrente e tensão
B_w	Banda passante
C_p	Eficiência da turbina
e	Erro
f	Frequência da fonte
f_a	Frequência de amostragem
f_r	Frequência elétrica no rotor
f_s	Frequência elétrica no estator
f_s	Frequência de chaveamento
i_{dGSC}	Corrente de eixo direto GSC
i_{qGSC}	Corrente de eixo em quadratura GSC
I_b	Corrente de base
$k_{iV_{cc}}$	Ganho integral de controle de tensão
$k_{pV_{cc}}$	Ganho proporcional de controle de tensão
k_p	Constante de inclinação
L_f	Indutância do filtro
L_l	Indutância da rede
p	Razão de modulação
P_b	Potência de base
P_0	Potência inicial
P_s	Potência ativa do estator
P_s^*	Potência ativa de referência no estator
P_T	Potência total
P_w	Potência aerodinâmica
Q_s	Potência reativa do estator
Q_s^*	Potência reativa de referência no estator
r	Raio da turbina
R_f	Resistência do filtro
R_l	Resistência da rede
s	Escorregamento
S_{CC}	Potência de curto circuito no primário do transformador
S_{PC}	Potência de curto circuito visto no ponto de conexão
T_{mec}	Torque mecânico

T_e	Torque elétrico
V_{PC}	Tensão no ponto de conexão
V_0	Tensão inicial
V_b	Tensão de base
v_b	Velocidade de base
v_g	Velocidade do gerador
v_w	Velocidade do vento
Z_b	Impedância de base
Z_l	Impedância da linha de distribuição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO	17
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	ESTADO DA ARTE	18
2.2	EXTRAÇÃO DE POTÊNCIA POR MEIO DE UMA TURBINA EÓLICA	21
2.3	MÁQUINA ASSÍNCRONA DUPLAMENTE ALIMENTADA	23
2.4	CONVERSORES ESTÁTICOS APLICADOS A GERADORES EÓLICOS	24
2.4.1	Operação do GSC Como Retificador	27
2.4.2	Operação do Conversor Como Inversor	28
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
3	REQUISITOS TÉCNICOS	31
3.1	RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482	31
3.2	PRODIST - MÓDULO 8	32
3.3	MODELO DA REDE RURAL	34
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
4	MODELAGEM DO GIDA	40
4.1	A TRANSFORMAÇÃO DE <i>PARK</i> APLICADA AO GIDA	41
4.2	EQUAÇÕES DAS TENSÕES NO REFERENCIAL SÍNCRONO	42
4.3	REFERENCIAL NO FLUXO ESTATÓRICO	46
4.4	EQUAÇÕES DE TORQUE E POTÊNCIA ATIVA E REATIVA	49
4.5	CAPABILIDADE DO GIDA	51
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
5	PROJETO DO CONTROLADOR	53
5.1	INTRODUÇÃO	53
5.2	CONTROLADOR DAS CORRENTES ROTÓRICAS	53
5.3	CONTROLADOR DE POTÊNCIA	55
5.4	CONTROLADOR DO GSC	58
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	64
6.1	PROCEDIMENTO DE SINCRONISMO	64
6.2	OPERAÇÃO DO GSC	66
6.3	OPERAÇÃO DO RSC	67
6.4	RESULTADOS INICIAIS COM REDE IDEAL	69
6.5	VARIAÇÃO DE TENSÃO EM REDE RURAL	73
6.5.1	GIDA com FP unitário	73
6.5.2	GIDA com FP indutivo	76

6.5.3 GSC fornecendo reativos	82
6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
7 CONCLUSÃO	85
REFERÊNCIAS	87
Apêndice A – DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL	91
A.1 PARÂMETROS DO GIDA	91
A.2 PARÂMETROS GERAIS	93
A.3 <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO	93

1 INTRODUÇÃO

A inserção de geração eólica na rede elétrica vem crescendo anualmente superando expectativas a nível mundial. Em 2016 o incremento foi de 12,5% da capacidade instalada em relação ao ano anterior. A China aparece neste cenário sendo o país com o maior investimento nesta tecnologia. Neste cenário o Brasil tem demonstrado aumento no investimento neste tipo de energia, resultando no ano de 2016, compor o grupo das dez nações com maior capacidade instalada de energia eólica do mundo ocupando a nona posição, representando cerca de 2,2% da capacidade instalada conforme é possível observar na Tabela 1 (GWEC, 2017).

Tabela 1: Capacidade instalada a nível mundial

País	Potência (GW)	Participação
China	168,690	34,7%
EUA	82,184	16,9%
Alemanha	50,018	10,3%
Índia	27,700	5,9%
Espanha	23,074	4,7%
Reino Unido	14,543	3,0%
França	12,066	2,5%
Canadá	11,900	2,4%
Brasil	10,740	2,2%
Itália	9,257	1,9%
Resto do Mundo	75,577	15,5%
Total mundial	486,749	100,0%

Fonte: GWEC (2017, p.3)

No cenário da América Latina, isto representa liderança absoluta do setor com aproximadamente 70,2% da capacidade instalada. Ao final de 2016 foram alcançados 10,740 GW porém alguns parques eólicos ainda não estão conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), devido a atrasos na execução de linhas de transmissão.

Neste contexto, o gerador que tornou-se amplamente utilizado em turbinas eólicas é o Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA) mas acompanhado de perto pela crescente

utilização do gerador síncrono com ímã permanente (PMSG, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator*) (GONZÁLEZ; ARÁNTGUI, 2016). Na Figura 1, é mostrado um diagrama resumido de um GIDA conectado à rede elétrica exemplificando sua forma de conexão.

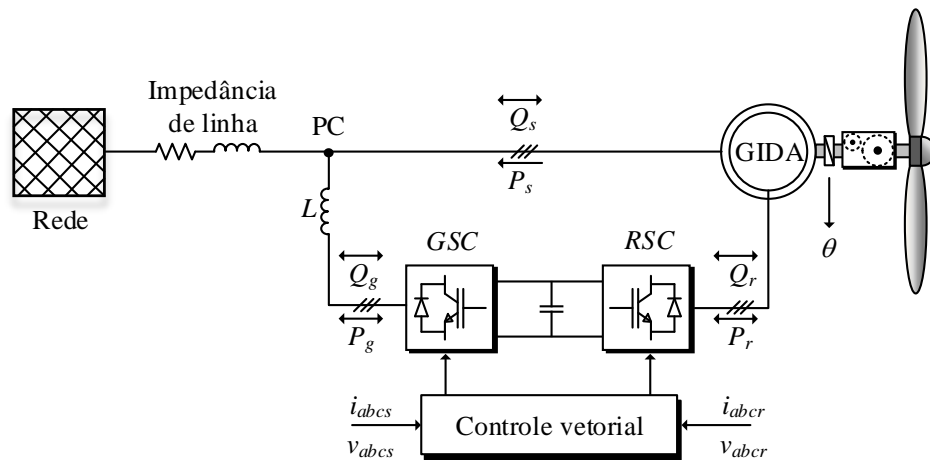


Figura 1: Visão geral do GIDA.

Observa-se na Figura 1, que o gerador é conectado à rede elétrica através do estator e o conversor estático do tipo *back-to-back* é o responsável pelo controle do fluxo de energia entre rotor e rede elétrica, ou seja, parte da potência é processada neste estágio podendo seu fluxo ser do rotor para a rede ou vice-versa. Este trabalho irá denominar o conversor *back-to-back* em duas partes: o conversor do lado da rede (GSC, do inglês *grid side converter*) e o conversor do lado do rotor (RSC, do inglês *rotor side converter*).

1.1 MOTIVAÇÃO

Com a crescente demanda por energia elétrica, a utilização de fontes energéticas diversificadas ganha relevância no âmbito nacional e a possibilidade de utilizar fontes limpas de geração tornam a ideia mais atrativa. A resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) N° 482 e N° 687, estabelecem os requisitos gerais de conexão à rede elétrica de pequenos geradores. Ela classifica a geração distribuída (GD) como: micro geração até 75 kW e mini geração até 5 MW (ANEEL, 2012, 2015).

Segundo registros da ANEEL, a GD a partir de fontes eólicas é pouco explorada, são 10.168,10 kW contra 70.312,78 kW em energia fotovoltaica mas como o potencial eólico é grande, é importante verificar os impactos e medidas a serem tomadas para reduzir os efeitos provenientes da inserção de geração eólica (ANEEL, 2017b).

Conforme é descrito por Singh e Kaur (2014, p.73), o advento dos geradores

assíncronos, conquistaram um espaço significativo na utilização da geração de energia elétrica atualmente. Ao se utilizar o GIDA, obtém-se uma importante vantagem: com o sistema variável de velocidade é possível manter praticamente constante o torque do gerador frente as variações do vento.

Alguns trabalhos apresentam a conexão de geradores em rede rural, porém o fazem de modo monofásico e não consideram a impedância da rede, assim não há possibilidade de verificar o impacto da inserção de potência ativa no perfil de tensão (MACHADO et al., 2005; JACOBINA et al., 2006; VIAJANTE et al., 2014). Uma análise da variação de tensão no PC é realizada em Lima et al. (2014) porém, a rede de distribuição considerada é em média tensão, e os resultados apresentados são feitos em ambiente computacional apenas. Portanto, a implementação completa do conversor *back-to-back* para o funcionamento do GIDA conectado em uma rede rural emulada para baixa tensão, farão parte deste trabalho compondo resultados experimentais para atingir os objetivos delimitados.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem os seguintes objetivos:

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver o controle de potência ativa e reativa, consequentemente as correntes injetadas no ponto de conexão (PC) em redes rurais fracas contribuindo com a regulação de tensão.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o estado da arte sobre a contribuição das turbinas eólicas para a regulação de tensão;
- Modelar matematicamente o gerador de indução duplamente alimentado;
- Modelar uma rede rural para objeto de estudo;
- Projetar o controlador da malha interna de corrente e externa de potência para o RSC;
- Apresentar uma equação de variação do perfil de tensão no PC;
- Validar o controle através de uma plataforma experimental.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

O desenvolvimento de uma equação que relaciona a variação de tensão no PC em função da potência inserida é realizado e sua validação é confirmada experimentalmente. O desenvolvimento de uma plataforma experimental possibilita a análise de funcionamento completo do GIDA. Os modos de operação sub e sobre síncrono podem ser estudados e avaliados devido a implementação do conversor *back-to-back*.

A rede rural é apresentada e emulada, viabilizando a verificação experimental da variação do perfil de tensão no PC em função da potência inserida ou consumida. Também é evidenciada a influência que as parcelas de potência ativa e reativa tem sobre a variação de tensão no PC.

Alguns artigos foram produzidos neste período de elaboração da dissertação:

- i. Artigo publicado e apresentado no XXI Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2016, com o título: “Contribuição ao estudo de um DFIG conectado em rede fraca”.
- ii. Artigo aprovado e apresentado no INDUSCON 2016, 12º IEEE/IAS *International Conference on Industry Applications*, com o título: “Controle da potência ativa e reativa de uma micro turbina eólica GIDA em rede rural”.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado da seguinte forma: No Capítulo 2 é apresentada uma breve revisão sobre os geradores de dupla alimentação e sua evolução ao longo dos anos. O Capítulo 3 mostra de forma simplificada os efeitos da inserção da geração de energia eólica e o que está sendo modificado em relação a legislação no que tange a conexão ao sistema elétrico de potência de novas fontes de energia elétrica, também é apresentado o equacionamento de variação de tensão no PC. Com o Capítulo 4 apresenta-se o estudo do gerador de indução duplamente alimentado com uma abordagem das suas equações em eixo síncrono que posteriormente será utilizado no projeto do controlador no Capítulo 5. Por fim, resultados experimentais são apresentados no Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o histórico e desenvolvimento da energia eólica, quais geradores são utilizados, extração da potência dos ventos e ainda mostra como a eletrônica de potência contribui neste cenário de geração de energia elétrica utilizando fontes renováveis.

2.1 ESTADO DA ARTE

A energia dos ventos tem sido utilizada por pelo menos 3000 anos. Até o começo do século XX, a energia eólica era basicamente utilizada para prover energia mecânica para bombear água ou moer grãos. Com o início da industrialização e a necessidade de obter um sistema mais estável de energia para os novos equipamentos, motores a combustão proveniente de combustível fóssil e a própria rede elétrica assumiram esta demanda. Com a crise do petróleo na década de 70, renasce o interesse por fontes renováveis de energia, agora com o propósito de transformar o potencial eólico em energia elétrica (ACKERMANN, 2005, p.7).

O desenvolvimento da tecnologia nos anos seguintes fez com que a geração de energia elétrica por meio desta fonte renovável, ganhasse a preferência dentre as fontes disponíveis e atingindo índices de expansão capaz de dobrar a capacidade instalada a cada 3 anos até o fim do século XX. Hoje em dia turbinas de 5 MW são fabricadas a nível comercial e o primeiro protótipo em funcionamento com 8 MW foi instalado em 2014 na Dinamarca utilizando PMSG (VESTAS, 2014).

Na Tabela 2 é exposta a evolução no desenvolvimento das turbinas eólicas onde observa-se o aumento da potência ligado ao crescimento do rotor e consequentemente a altura da torre.

Hansen (2005) mostra que os geradores utilizados em turbinas eólicas até fim da década de 1990 eram operados em velocidade fixa utilizando geradores do tipo gaiola de esquilo ou rotor bobinado. Sua simplicidade de projeto e operação tornava-os vantajoso embora não podiam manter um aproveitamento ótimo da velocidade do vento. Em contrapartida, a utilização

Tabela 2: Evolução das turbinas eólicas

Ano	Capacidade (kW)	Diâmetro do rotor (m)
1985	50	15
1989	300	30
1992	500	37
1994	600	46
1998	1500	70
2003	3000-3600	90-104
2004	4500-5000	112-128
2007	7000	127
2014	8000	164

Fonte: Adaptado de Ackermann (2005, p.8)

de turbinas eólicas de velocidade variável, ganharam seu espaço nas últimas duas décadas e proporcionam máxima eficiência aerodinâmica, permitindo ajustar a velocidade rotacional ω (rad/s) para velocidade do vento v_w (m/s). Desta maneira a razão máxima de velocidade λ é deixada constante, correspondendo ao coeficiente de potência máxima conforme é apresentado na equação (1).

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{v_w} \quad (1)$$

onde r (m) é o raio da turbina.

Conforme Hansen (2005, p.57) explica, a utilização de geradores em turbinas eólicas requer uma análise com relação a velocidade da turbina: se ela é fixa ou variável. Desta maneira obtém-se as possibilidades de uso dos geradores conforme são expostos na Tabela 3 onde temos as seguintes definições: gerador de indução tipo gaiola de esquilo (SCIG, do inglês *Squirrel Cage Induction Generator*); gerador de indução com rotor bobinado (WRIG, do inglês *Wound Rotor Induction Generator*); gerador síncrono com rotor bobinado (WRSG, do inglês *Wound Rotor Synchronous Generator*) e PMSG.

Tabela 3: Controle de velocidade e geradores

	SCIG	WRIG	WRSG	PMSG
Velocidade fixa	X			
Velocidade variável		X	X	X

Os primeiros geradores explorados comercialmente eram do tipo SCIG, sua principal vantagem era o baixo custo embora não pudesse operar em grandes faixas de velocidade do vento. Com a evolução das pesquisas em geração eólica, pode-se chegar a equipamentos com variação limitada de velocidade, em torno de 10% como é o caso do *Opti-slip induction*

generator (OSIG) onde um WRIG possui um sistema de variação da resistência rotórica de modo a obter a mudança do escorregamento. Poder operar sob velocidade limitada mas variável é uma de suas vantagens, mas o problema consiste que neste tipo de gerador o controle da potência ativa e reativa não é muito preciso. Para contornar esta dificuldade, os geradores WRSG e PMSG utilizando conversores eletrônicos de potência, permitem a operação de velocidade variável com controle de potência facilitado (SANDHYA; CHANDAN, 2011).

Fica evidente a constante busca pela evolução dos sistemas eólicos de geração de energia elétrica e cada vez mais busca-se melhorar a eficiência e aumentar a potência elétrica de uma única unidade geradora com o objetivo de otimizar cada vez mais os parques eólicos.

No tocante do desenvolvimento de novas tecnologias, o GIDA trouxe avanços importantes com relação a eficiência e baixo custo de instalação. Neste caso a faixa típica de variação de velocidade em torno da velocidade síncrona fica em torno de -40% a +30%. Um conversor parcial conectado ao rotor, processa aproximadamente 30% da potência nominal do gerador, realizando a compensação de reativos e conexão suave com a rede energia elétrica (HANSEN, 2005; AHUJA et al., 2011). Mais detalhes sobre o funcionamento deste tipo de conversor, serão abordados na seção 2.4.

A inserção de dispositivos eletrônicos de potência, proporciona aplicar técnicas de controle com inúmeras vantagens para o sistema. Estes conversores de potência podem não somente serem utilizados de forma parcial, como também podem ser inseridos aos geradores de forma plena, ou seja, toda a energia gerada é processado por eles.

Com a utilização de conversores pleno, basicamente dois são os tipos de geradores utilizados:

- I. WRSG ou WRIG com excitação elétrica externa;
- II. PMSG com ímã permanente.

Desta maneira, a vantagem deste tipo de conversor é poder ser utilizado de tal maneira a compensar os reativos e também realizar o controle do fluxo de potência durante a sincronização com a rede, permitindo uma suavidade do sistema durante a conexão (HANSEN, 2005, p.59).

Assim os trabalhos desenvolvidos, demonstram a capacidade da evolução dos geradores eólicos ao longo dos últimos anos e reforçam ainda mais as possibilidades para o horizonte de investimentos em energia renovável desta fonte de geração de energia elétrica.

Boa parte da energia elétrica gerada atualmente, ainda utiliza fontes combustíveis não renováveis que aceleram o efeito estufa. A redução da disponibilidade destas fontes de

energia, faz com que as fontes renováveis, quais sejam: eólica, solar, hidráulica, biomassa e outras, ganhem cada vez mais a atenção em novos investimentos. A utilização do GIDA vem se mostrando cada vez mais popular em grandes sistemas eólicos, embora o PMSG tenha aumentada a sua parcela de contribuição (TAZIL et al., 2010; GONZÁLEZ; ARÁNTGUI, 2016).

Conforme GWEC (2017) em 2016 o potencial de energia eólica acumulado mundialmente, alcançou 486,7 GW com instalação neste mesmo ano, de 54,6 GW de potência.

Este incremento significativo na capacidade instalada de geração eólica é resultado do desenvolvimento tecnológico ao longo das últimas décadas, passando pelo uso de geradores eólicos de velocidade fixa até os geradores eólicos de velocidade variável. Neste cenário, Sun et al. (2009, p.1) afirma que apesar das vantagens destes tipos de geradores, novos problemas são introduzidos nos sistemas de potência devido a alta penetração destas que causam flutuações da potência entregue devido as variações aleatórias e naturais da velocidade do vento.

Buscando aproveitar a evolução dos sistemas de geração de energia a partir de fontes renováveis, a geração distribuída ganha espaço no cenário mundial, com usinas geradoras distantes do centro consumidor sendo controladas de forma descentralizada com controle de supervisão local. Deste modo a geração eólica e fotovoltaica apresentam um grande distanciamento econômico e ecológico das grandes usinas. As fontes renováveis apresentam forte crescimento e tornam-se cada vez mais populares (MOHAN, 2014, p.224).

Tão importante como conhecer as tecnologias envolvidas na geração eólica é saber quais as grandezas envolvidas na energia do vento bem como extrair esta potência proveniente de sua força, com esta visão na próxima seção será abordado este tema.

2.2 EXTRAÇÃO DE POTÊNCIA POR MEIO DE UMA TURBINA EÓLICA

Para a produção de energia elétrica através de uma fonte renovável como é a energia do vento, faz-se necessário conhecer algumas características e conforme é mostrado por Knudsen e Nielsen (2005) a extração da energia cinética do vento tem algumas particularidades que limitam o seu aproveitamento:

- Possui variação estocástica;
- Não é possível extrair 100% da energia do vento, pois para que isso ocorra a velocidade do vento atrás da turbina deveria ser zero, ou seja, é fisicamente impossível;

- Em 1926 Albert Betz conseguiu determinar a máxima potência possível de ser extraída do vento, este valor atinge o máximo de 59,3% ficando conhecido como limite de *Betz*;
- Levando em conta as perdas no sistema de acoplamento da turbina ao gerador, especifica-se o coeficiente de eficiência da turbina (C_p) na faixa de 0,46 a 0,48.

C_p é função de λ e do ângulo de passo (β) e pode ser definido através da equação (3):

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\left(\frac{12,5}{\lambda_i}\right)} \quad (3)$$

A potência aerodinâmica (P_w) que pode ser extraída por meio de uma turbina, é determinada através da equação (4) já considerando o limite de extração real de potência dado pelo coeficiente C_p (LEI et al., 2013; SLOOTWEG et al., 2001).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_p v_w^3 \quad (4)$$

sendo ρ a densidade do ar (kg/m^3), r o raio da turbina (m), v_w a velocidade do vento (m/s) e C_p indica a eficiência da turbina e é função de λ e do ângulo de passo (β).

O cálculo do torque produzido pela força do vento passando pela turbina, é calculado pela equação (5):

$$T_w = \frac{1}{2} \rho \pi r^3 \frac{C_p}{\lambda} v_w^2 \quad (5)$$

A Figura 2 apresenta a potência de saída de uma turbina em função de v_w e da velocidade do gerador (v_g) utilizando as equações (2 -4). É fácil verificar o compromisso com a máxima potência para cada curva de vento em função da velocidade do gerador, isso significa que para cada velocidade do vento, determina-se uma velocidade do gerador, esse rastreamento da máxima potência resulta em um algoritmo chamado *Maximum power point tracking* (MPPT) que busca otimizar a unidade de geração eólica. É importante ressaltar que o MPPT não é escopo deste trabalho, mas pode ser explorado através de um grande número de publicações, dos quais destacam-se Zhao et al. (2006), Dida e Benattous (2015).

O GIDA por se tratar de um gerador de velocidade variável, pode trabalhar em função do manutenção da máxima eficiência do gerador eólico e na próxima seção, uma descrição sobre esta máquina é realizada a fim de mostrar as principais características desta.

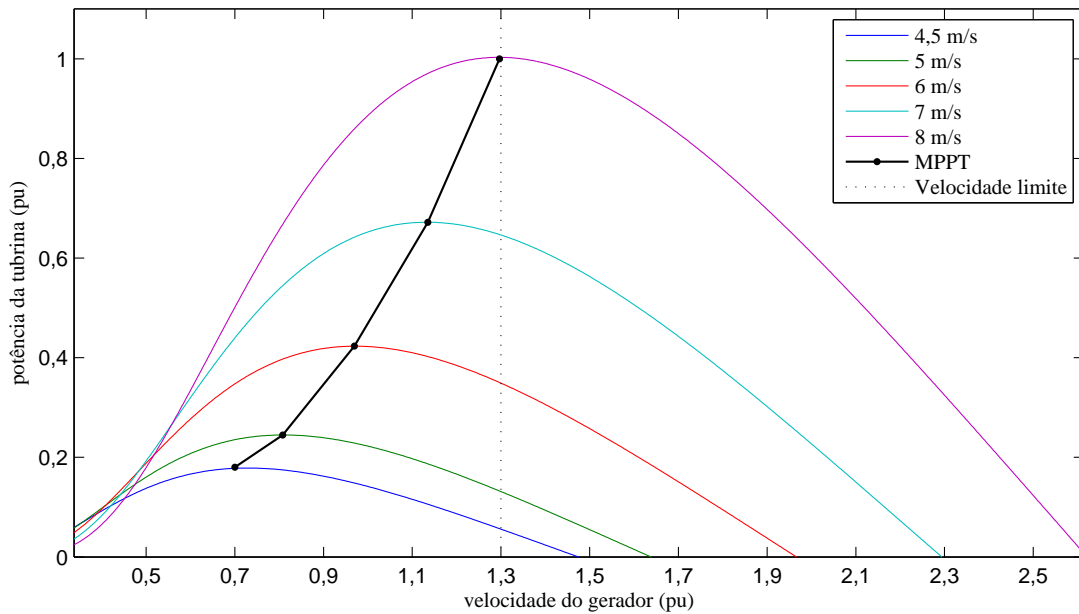


Figura 2: Característica de potência da turbina com β constante.

2.3 MÁQUINA ASSÍNCRONA DUPLAMENTE ALIMENTADA

Uma máquina de indução com rotor bobinado é construída em um enrolamento polifásico semelhante ao estator com o mesmo número de polos. Anéis deslizantes montados sobre o rotor conectam-se ao enrolamento, o que permite acessar estas bobinas externamente (FITZGERALD et al., 2006, p.297).

Embora o GIDA seja muito parecido com SCIG, a IEEE Std 112 (2014, p. 18) que indica como ensaiar estas máquinas, deixa claro que a impedância de uma máquina com rotor bobinado varia conforme a posição do rotor em relação ao estator e é necessário realizar o teste de rotor bloqueado observando a corrente média no estator. Este processo é realizado curto circuitando o rotor e movimentando o eixo de forma que seja possível observar a variação da corrente na faixa de um passo polar. Isso faz uma máquina com particularidades que serão exploradas ao longo do trabalho.

Para máquinas assíncronas, a diferença de velocidade do rotor e a do campo girante do estator é conhecida como escorregamento, portanto a tensão induzida no rotor terá frequência proporcional a velocidade conforme é apresentada na equação (6).

$$f_r = s f_s \quad (6)$$

onde:

- f_r = frequência elétrica no rotor (Hz);
- s = escorregamento;
- f_s = frequência elétrica no estator (Hz).

Fitzgerald et al. (2006, p.297) mostra que o comportamento elétrico de uma máquina de indução se assemelha ao funcionamento de um transformador, porém apresenta mudança de frequência em função do movimento relativo entre os enrolamentos do rotor e estator. Como o enrolamento do rotor desta máquina está acessível, é possível controlar as grandezas elétricas envolvidas de forma a obter o seu controle total.

Estas informações sobre a máquina assíncrona, desempenham uma base fundamental na compreensão do funcionamento desta como unidade geradora. É comum este tipo de máquina ser utilizada em geradores eólicos para produção de energia elétrica por meio de fonte renovável, sendo que a característica de escorregamento da frequência do rotor será muito útil na utilização de conversores estáticos no processamento parcial e não total da energia gerada.

Quando o GIDA está conectado na rede elétrica, ao ocorrer um curto circuito ele pode contribuir com o sistema fornecendo reativos, pois o estator está diretamente conectado. Neste caso, um circuito ou método de controle adequado deve então limitar o nível de corrente e tensão no rotor evitando assim danos ao RSC. Todavia isto acaba limitando a capacidade do gerador de ficar conectado e contribuir para restabelecer a estabilidade do sistema elétrico pois o fornecimento de potência ativa é reduzido (TEODORESCU et al., 2011, p.126).

A utilização desta máquina em geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, dar-se-á pela utilização de conversores de potência que são utilizados na interligação do circuito rotórico com a rede elétrica. Neste contexto na próxima seção é apresentado um estudo sobre as topologias empregadas no GIDA e o seu princípio de funcionamento.

2.4 CONVERSORES ESTÁTICOS APLICADOS A GERADORES EÓLICOS

A conexão de uma turbina eólica com a rede elétrica, não é um processo simples e requer atenção a fim de evitar possíveis instabilidades do sistema. Sobretudo, a utilização de conversores eletrônicos de potência principalmente no lado da rede e junto com o controle do ângulo de passo das hélices, melhoram a capacidade da turbina eólica e faz com que apresente características mais próximas das usinas tradicionais (TEODORESCU et al., 2011, p.123).

O controle de uma turbina eólica visa a máxima extração de potência ativa, porém com

índices de penetração cada vez mais elevados no sistema elétrico, faz-se necessário o controle de energia reativa para fins de regulação de tensão da rede elétrica e capacidade de curto circuito.

A otimização da extração da energia eólica pode ser dividida em basicamente três estágios conforme Teodorescu et al. (2011, p.124):

- **Mecânica:** composto pelos controles de ângulo das hélices, direção da nacele, e velocidade do eixo do rotor.
- **Eletromecânica:** constituído pela máquina de conversão de energia mecânica em elétrica.
- **Elétrica:** responsável pela adaptação das tensões e correntes geradas para conexão à rede.

Os conversores estáticos utilizados em turbinas eólicas podem processar toda a energia gerada, chamados de conversores plenos, ou processar parte desta, sendo chamados de conversor parcial, caso em que são utilizados em geradores do tipo GIDA, objeto de estudo desta seção.

Para um GIDA, a estrutura típica é a apresentada na Figura 3, topologia na qual o conversor estático processa aproximadamente 30% da potência do gerador, com o compromisso da faixa de velocidade da turbina ficar em torno de $\pm 30\%$ da velocidade nominal. O conversor no lado do gerador, é conectado ao rotor por meio de anéis coletores e o conversor do lado da rede pode ser conectado diretamente ou através de transformador para adequar os níveis de tensão quando necessário.

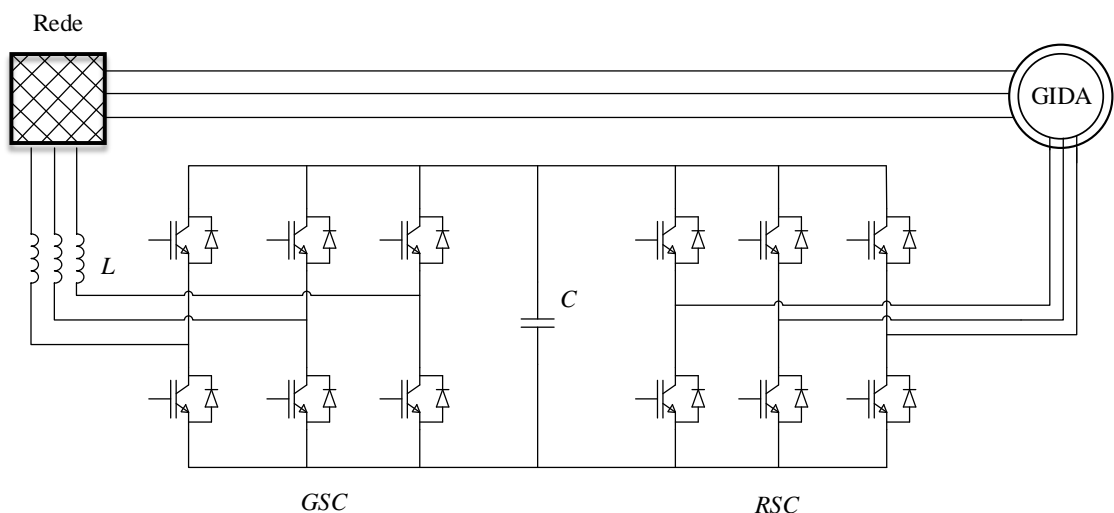


Figura 3: Conversor *back-to-back*.

Em geradores GIDA o conversor utilizado é normalmente conhecido por *back-to-back* e pode ser visualizado na Figura 3. Este tipo de estrutura, proporciona bom controle de potência e possibilita a redução de harmônicos injetados na rede (TEODORESCU et al., 2011, p.131).

A ideia de um conversor parcial, advém da análise do balanço de potência do sistema eólico utilizando GIDA. Tem-se a energia mecânica transferida ao gerador que transforma em energia elétrica no estator e o rotor recebe uma parcela desta. Assim obtemos equações que vão determinar o funcionamento do gerador e conversores (VOLTOLINI, 2007):

$$P_{mec} = P_s - P_r \quad (7)$$

onde

- P_{mec} = potência mecânica;
- P_s = potência no estator;
- P_r = potência no rotor.

Define-se então a potência mecânica, com ω_m sendo a velocidade mecânica angular do gerador:

$$P_{mec} = T_{mec} \omega_m \quad (8)$$

Com o foco na estabilidade da máquina em regime permanente, os torques mecânico (T_{mec}) e elétrico (T_e) são iguais e desta maneira pode-se reescrever a equação 8 em função da velocidade elétrica, sendo ω_s a velocidade angular síncrona do estator. Assim obtém-se:

$$P_{mec} = T_e (1 - s) \omega_s \quad (9)$$

ou

$$P_{mec} = T_e \omega_s - s T_e \omega_s \quad (10)$$

desta maneira as potências obtidas pelo estator e o rotor, são dadas pelas equações 11 e 12:

$$P_s = T_e \omega_s \quad (11)$$

$$P_r = P_{mec} - P_s = s T_e \omega_s \quad (12)$$

ou

$$P_r = s P_s \quad (13)$$

Observando a equação (13), é notável que a potência dos conversores que conectam ao rotor, precisam ser dimensionados de forma parcial em relação a potência do gerador se a velocidade ficar em uma faixa limitada de variação em torno da velocidade síncrona. Desta maneira se a região de operação for $0,7\omega_s \leq \omega_m \leq 1,3\omega_s$, isto proporcionará projetar os

conversores associados com 30% da potência do gerador conforme já descrito anteriormente (VOLTOLINI, 2007).

A velocidade do gerador irá determinar a forma de operação do conversor *back-to-back*, pois o fluxo de potência ativa relacionado ao rotor e a rede pode ter duplo sentido. Quando o gerador está operando na velocidade sub síncrona, o rotor demanda energia da rede e quando está na sobre síncrona, o rotor envia potência para a rede. Fica evidente dois modos de operação para o conversor *back-to-back*, inversão e retificação, sendo estas etapas de funcionamento descritas na sequência.

2.4.1 Operação do GSC Como Retificador

O conversor conectado à rede, conforme apresentado na Figura 3, atuando como retificador caracteriza uma importante etapa do funcionamento. O seu objetivo é manter o nível de tensão no barramento CC de forma estável, proporcionando também um fator de potência unitário, uma vez que estará absorvendo energia da rede e desta maneira otimiza o fluxo de potência.

Segundo Barbi et al. (2002, p.1) esta topologia possui característica bidirecional em fluxo de potência e a tensão de saída retificada, deverá possuir um valor maior do que o valor de pico apresentado na linha, embora valores menores também são facilmente obtidos.

O conversor faz com que circule uma corrente da fonte para o capacitor carregando-o. Este fluxo é controlado através da modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*), que é empregada de tal forma que possibilite junto a uma malha de controle, manter o nível de tensão adequado no capacitor. De acordo com o valor da referência de tensão estabelecido, a medição da tensão no capacitor é então comparada gerando um sinal de erro que servirá para referenciar a comutação das chaves estáticas. Este controle com PWM é capaz de gerir não apenas a potência ativa, mas também a reativa (DIXON, 2011, p.225).

Devido a sua característica de reversibilidade, ao operar no modo retificador a topologia está em modo *boost*, e no modo *buck* quando inversor. Seu controle completo dar-se-á quando os seis diodos estiver reversamente polarizado, ou seja, com a tensão do barramento CC maior que o pico de tensão de linha da fonte senoidal. Desta maneira o diodo conduzirá apenas quando um transistor estiver ligado e houver a condição favorável da fonte senoidal de forma a circular esta corrente para o barramento. A indutância de linha é importante pois ela gera uma tensão induzida responsável pela polarização do diodo no momento de enviar corrente ao capacitor (DIXON, 2011, p.227).

Conforme Dixon (2011), no controle do barramento CC, é utilizado uma realimentação no qual o valor da tensão é medido e comparado a uma referência produzindo um sinal de erro (e), que é utilizada para gerar uma forma de onda senoidal com a mesma frequência da fonte que servirá de referência para os sinais PWM para o controle dos transistores. Um importante parâmetro que pode ser analisado na modulação é a razão de modulação que é definido na equação (14).

$$p = \frac{f_s}{f} \quad (14)$$

onde:

- p = razão de modulação;
- f_s = frequência de chaveamento;
- f = frequência da fonte.

É importante observar que quanto maior for o p , melhor será a forma de onda da corrente que será drenada da fonte, isto é observado na Figura 4, contudo deve haver um compromisso entre a frequência de chaveamento e a capacidade das chaves em operar em frequências elevadas.

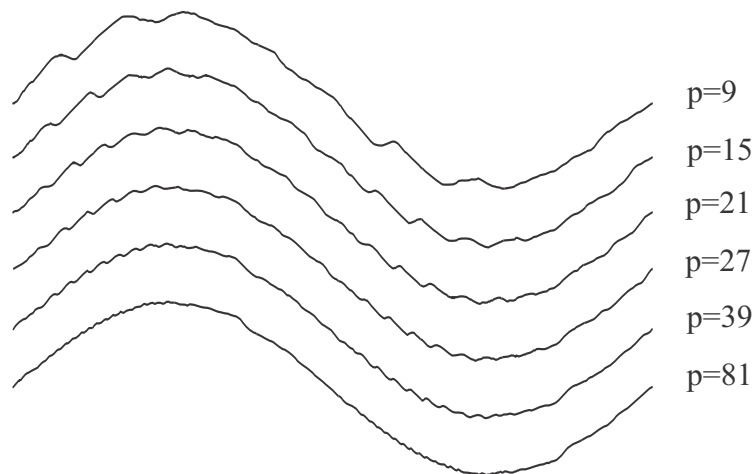


Figura 4: Formas de onda da corrente para diferentes valores de p .

Fonte: Adaptado de Dixon (2011, p.236).

2.4.2 Operação do Conversor Como Inversor

Tanto o GSC quanto o RSC podem funcionar no modo inversor de acordo com o ponto de operação do gerador, se estiver na velocidade sub síncrona, o RSC funciona como inversor,

já na sobre síncrona é o GSC que atua neste modo. Os inversores de potência tem como objetivo produzir uma forma de onda senoidal a partir de uma fonte CC. Podem ser inversores de corrente ou tensão. Este último é mais utilizado em aplicações industriais, possuindo na saída formas de ondas com valores discretos com taxa de variação elevada em vez de suave. Um exemplo desta característica pode ser visualizado na Figura 5 (ESPINOZA, 2011, p.357).

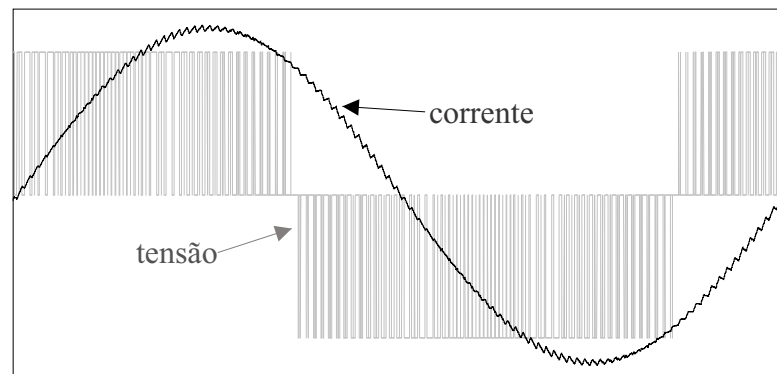


Figura 5: Formas de onda para corrente e tensão na saída do inversor.

Fonte: o autor.

As técnicas de modulação PWM mais usadas são: modulação senoidal com portadora triangular, *space vector* e *selective-harmonic-elimination* (SHE). Se o inversor é uma fonte de tensão, ele gera uma onda alternada discreta, composta de variações de tensão exigindo uma carga ou filtro indutivo de modo a produzir uma corrente suave (ESPINOZA, 2011, p.358).

A técnica de modulação *space vector modulation* (SVM), é utilizada na implementação de sistemas de controle digitais, onde são definidos vetores de comutação das chaves estáticas de forma a utilizá-los em cada amostragem, durante um tempo específico que é calculado através de uma transformação (ESPINOZA, 2011, p.372).

Esta transformação permite identificar a posição em que se encontra o vetor a ser sintetizado pelos vetores de estado daquela região.

Em geradores de rotor bobinado que trabalham sob velocidade variável, o conversor conectado por meio de anéis coletores, permite manter uma alimentação com frequência variável no rotor a fim de o gerador gerar energia na frequência síncrona do fluxo girante compensando assim o escorregamento existente (DIXON, 2011, p.244).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso da energia eólica não é recente e aproveitá-la para geração de energia elétrica, é uma alternativa para suprir a demanda mundial. A utilização do gerador assíncrono GIDA, requer o emprego de conversores estáticos de potência para propiciar o controle de potência desta máquina. Neste caso um conversor tipo *back-to-back*, permite realizar o controle da potência do estator, que está conectado diretamente à rede elétrica, através de sua conexão ao rotor.

Por fim, a necessidade de controlar apenas uma parcela da potência total gerada, faz com que o conversor estático necessite ser dimensionado para uma potência que é proporcional ao escorregamento definido para a operação da máquina, ficando em torno de 30%. Neste trabalho o GIDA será conectado a uma rede de baixa tensão, caracterizando assim uma geração distribuída conforme será descrito no Capítulo 3.

3 REQUISITOS TÉCNICOS

Com o objetivo de garantir a qualidade dos sistemas elétricos de energia, os operadores do SEP a nível mundial, elaboram requisitos específicos que determinam a forma de conexão das turbinas e a sua contribuição ao sistema frente a falhas. Durante um afundamento de tensão, por exemplo, é exigido que a turbina continue conectada e em alguns casos fornecendo reativos para ajudar a recompor o sistema (COSTA, 2010; ONS, 2017).

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) estabelece a otimização do sistema elétrico por meio de procedimentos de rede, que no caso específico de geração eólica traz alguns requisitos mínimos para a conexão destas centrais junto a rede básica, de modo a garantir a segurança e qualidade da rede elétrica. Desta forma, os parques eólicos não podem limitar a capacidade de recomposição da rede, seja pela limitação dos equipamentos, ou por causa do tempo de recuperação do sistema (ONS, 2017).

Em se tratando de GD, a conexão de fontes eólicas de geração de energia deve observar principalmente o disposto na resolução normativa N° 482 e os Procedimentos de distribuição (PRODIST) (ANEEL, 2012, 2015, 2017a).

3.1 RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 482

A GD necessita de normas para as instalações de novas fontes de energia, desta forma a Resolução Normativa N° 482 e sua atualização a Resolução Normativa N° 687, estabelecem regras de acesso aos sistemas de distribuição de energia elétrica, potências máximas que podem ser conectadas e ainda define o sistema de compensação de energia.

Os principais pontos tratados na resolução N° 482 são:

- a) **Microgeração distribuída** é uma central de geração com potência inferior a 75 kW, através de cogeração ou fontes renováveis de energia elétrica, como a solar ou eólica, por exemplo.
- b) **Minigeração distribuída** é uma central de geração com potência maior que 75 kW e menor

ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW quando for cogeração qualificada.

- c) **Compensação de energia elétrica** é o sistema no qual a energia ativa injetada acumula um saldo para ser compensado em consumo de energia ativa.
- d) **Melhoria e reforço** são situações que buscam na instalação, substituição ou reforma de equipamentos em sistemas de distribuição para aumentar a capacidade e a confiabilidade do sistema.

A plataforma experimental desenvolvida, se encaixa como microgeração e a partir deste ponto observa-se a preocupação dos órgãos regulamentadores no Brasil com a qualidade de energia ao tratar e definir os conceitos de melhoria e reforço, fica mais evidente esta preocupação quando analisa-se o PRODIST, que determina uma série de conceitos a cerca dos procedimentos para conexão e os limites de operação do sistema a ser operado.

3.2 PRODIST - MÓDULO 8

O PRODIST tem como objetivo garantir a operação dos sistemas de distribuição com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade garantindo o acesso ao sistema de distribuição para conexão de geração distribuída propiciando a harmonia com o SEP que possui procedimentos de rede específicos.

A divisão em 10 módulos, torna o PRODIST um sistema complexo de procedimentos com diversos objetivos específicos. O módulo 8 torna-se referência neste trabalho devido a abordagem da qualidade de energia elétrica, impactando diretamente nas definições do sistema de controle da micro turbina eólica em estudo.

Conforme ANEEL (2017a), o módulo 8 é dividido em seções que tratam sobre a qualidade de energia, quais sejam: qualidade do produto, serviço e indicadores de qualidade. A seção sobre qualidade do produto aborda todos os pontos críticos que impactam na qualidade de energia elétrica tanto para regime permanente quanto para o transitório.

- a) **Tensão em regime permanente:** a partir de um valor de referência, os valores das leituras de tensão classificam-se em três categorias: adequadas, precárias ou críticas, que relacionam a diferença da medição com o valor de referência (VR) pré-estabelecido. A Figura 6 exemplifica os limites de tensão bem como a nomenclatura adotada para sistemas onde o ponto de conexão (PC) é inferior a 1 kV, podendo ser no sistema 220/127V ou 380/220V, adota-se graficamente valores em pu.

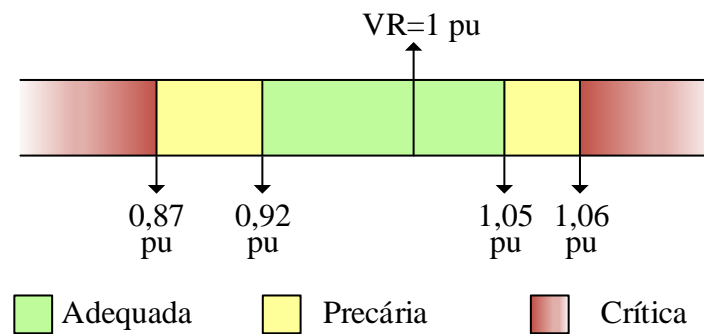


Figura 6: Variação de tensão para PC abaixo de 1kV.

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2017a).

Considerando que a operação no PC seja a faixa de 0,87 a 1,06 pu, fica estabelecido que a micro turbina eólica operará nesta faixa de tensão e a estratégia de controle será implementada de tal maneira que a micro turbina contribua para manter a tensão dentro desta faixa.

- b) **Fator de potência:** o PRODIST especifica o fator de potência para unidade geradora para instalações com tensão abaixo de 230 kV, um fator de potência (FP) mínimo de 0,92, indutivo ou capacitivo (ANEEL, 2017a).

O FP é determinado a partir dos valores medidos de potência ativa (P) e reativa (Q) definido pela Equação 15:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (15)$$

- c) **Harmônicos:** é definida como distorção harmônica aquelas associadas às deformações da forma onda original das tensões e correntes em relação a onda senoidal e sua frequência fundamental, desta forma, define-se também o cálculo e níveis permitidos destas distorções. Devem ser observados os limites expostos na Tabela 4, onde 95 % das leituras devem atender os requisitos.

Tabela 4: Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	$V_n \leq 1,0kV$
$DTT_{95\%}$	10,0 %
$DTT_{p95\%}$	2,5 %
$DTT_{l95\%}$	7,5 %
$DTT_{395\%}$	6,5 %

Fonte: Adaptado de ANEEL (2017a).

onde:

$DTT \rightarrow$ distorção harmônica total de tensão;

$DTT_P \rightarrow$ distorção harmônica total de tensão para componentes pares e não múltiplas de 3;

$DTT_I \rightarrow$ distorção harmônica total de tensão para componentes ímpares e não múltiplas de 3;

$DTT_3 \rightarrow$ distorção harmônica total de tensão para componentes múltiplas de 3.

- d) **Desequilíbrio de tensão:** fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição, embora para o sistema em baixa tensão não é definido um parâmetro de referência.
- e) **Flutuação de tensão:** tem por objetivo verificar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa também conhecido como *flicker* e é avaliado em sistemas de baixa tensão possuindo indicadores para constatar a severidade dos eventos durante o dia, curta duração ou durante a semana, longa duração.
- f) **Variação de tensão de curta duração:** consistem em mudanças no valor eficaz da tensão em curto espaço de tempo que vão desde um ciclo a três minutos observando o efeito sobre a tensão que pode ter o valor comprometido desde 0,1 até 0,9 pu no tempo considerado.
- g) **Variação de Frequência:** os limites de operação de frequência estão situados na faixa de 59,9 a 60,1 Hz em regime permanente. Ao ocorrer distúrbios no sistema de distribuição, o gerador conectado a rede que sair da faixa de 59,5 a 60,5 Hz, deve retornar a este padrão em até 30 segundos, para permitir o restabelecimento do equilíbrio carga-geração.

3.3 MODELO DA REDE RURAL

A rede rural emulada para contextualizar o cenário desejado para fins de verificação da variação de tensão no PC, é apresentada na Figura 7 onde é evidenciado a impedância da linha de distribuição (Z_l) com a característica predominantemente resistiva, um transformador de média para baixa tensão e o PC com a micro turbina e carga. A potência de curto circuito no primário do transformador é definida como S_{CC} e o nível de potência de curto circuito visto no PC é definido como S_{PC} .

A rede modelada apresenta as características aproximadas de uma rede rural fraca, para desta maneira, verificar a variação de tensão tanto em função da conexão de carga quanto da geração de potência ativa e reativa na micro turbina, assim será evidenciado as principais variações de tensão em função da potência ativa injeta ou consumida, e com a potência reativa gerando sua parcela de contribuição na regulação de tensão.

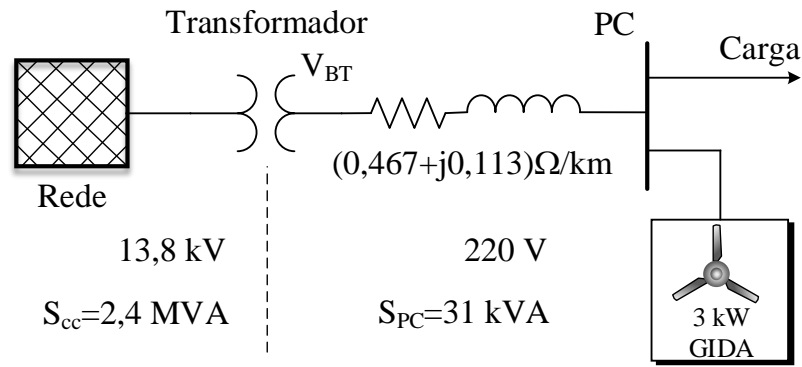


Figura 7: Modelo da rede rural.

A Figura 8 demonstra a característica resistiva da rede em função da distância dos terminais do transformador, que possui uma impedância igual a $(0,007 + j0,019)\Omega$. O ângulo vai reduzindo a medida que a linha aumenta a distância deixando claro a predominância resistiva desta configuração.

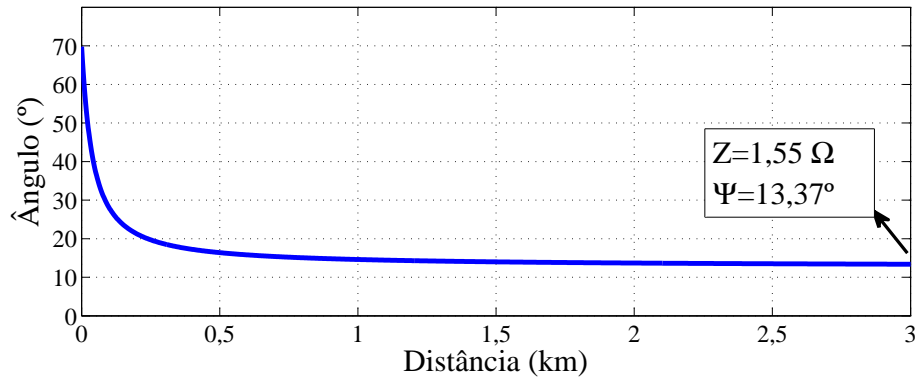


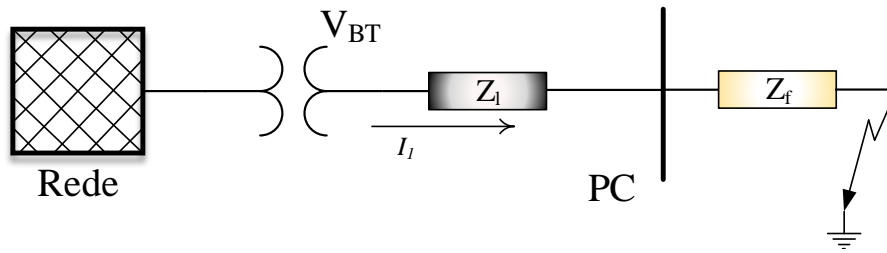
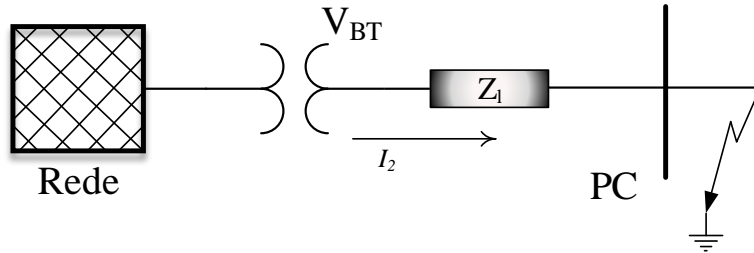
Figura 8: Ângulo ao longo da rede.

Para o cenário configurado, é possível analisar a variação de tensão (Δ_u) em função da potência injetada no PC, possibilitando desta maneira, verificar a nível de projeto se uma determinada potência de carga ou gerador possa provocar desvios maiores dos permitidos. Será desenvolvida uma equação que relacione esta variação às potências no PC. O trabalho realizado por Zhang e Bollen (2000), apresenta uma análise de afundamentos de tensão e a rede simplificada apresentada na Figura 9 é utilizada na análise para se determinar uma equação para Δ_u .

Considerando a rede apresentada na Figura 9-(a), a tensão no PC (v_{PC}) é dada por:

$$v_{PC} = Z_f I_1 = Z_f \frac{V_{BT}}{Z_l + Z_f} \quad (16)$$

onde, Z_f é a impedância de falta e normalizando a tensão em função do secundário do

(a) Rede para análise de Δ_u no cálculo de S_f .(b) Rede para análise de Δ_u no cálculo de S_{PC} .**Figura 9: Análise da variação de tensão no PC.**

transformador fazendo $V_{BT} = 1$, obtém-se,

$$V_{PC} = \frac{Z_f}{Z_l + Z_f} (pu) \quad (17)$$

A potência de falta (S_f) vista pelos terminais do transformador até a falta ocorrida na impedância Z_f , é obtida como:

$$S_f = V_{BT} I_1 = \frac{1}{Z_l + Z_f} (pu) \quad (18)$$

assim como a potência de curto circuito no PC vista pelos terminais do transformador é igual a:

$$S_{PC} = V_{BT} I_2 = \frac{1}{Z_l} (pu) \quad (19)$$

das equações (18) e (19), isolando-se Z_f e Z_l respectivamente chega-se a

$$Z_f = \frac{1}{S_f} - Z_l \quad (20)$$

$$Z_l = \frac{1}{S_{PC}} \quad (21)$$

Substituindo as equações (20) e (21) na equação (17) obtém-se a tensão no ponto de conexão expressa pelas potências envolvidas no ponto referido:

$$V_{PC} = 1 - \frac{S_f}{S_{PC}} \quad (22)$$

A potência expressa por S_f será substituída pela potência do gerador (S_g), desta forma V_{PC} é expressa por:

$$V_{PC} = 1 - \frac{S_g}{S_{PC}} \quad (23)$$

A variação de tensão no PC $\Delta_u = V_{BT} - V_{PC}$ é dada pela equação 24:

$$\Delta_u = \frac{S_g}{S_{PC}} \quad (24)$$

que pode ainda ser representada por:

$$\Delta_u = \frac{\sqrt{(S_g \cos(\varphi))^2 + (S_g \sin(\varphi))^2}}{S_{PC}} \quad (25)$$

onde,

Δ_u \rightarrow variação de tensão no PC,

S_{PC} \rightarrow potência de curto circuito no PC,

φ \rightarrow ângulo entre tensão e corrente do gerador que expressa o FP.

A convenção de sinais para as potências utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 10 e estabelece valores negativos de potência ativa como geração de energia elétrica, bem como a potência reativa é indutiva para valores positivos e capacitiva para negativos.

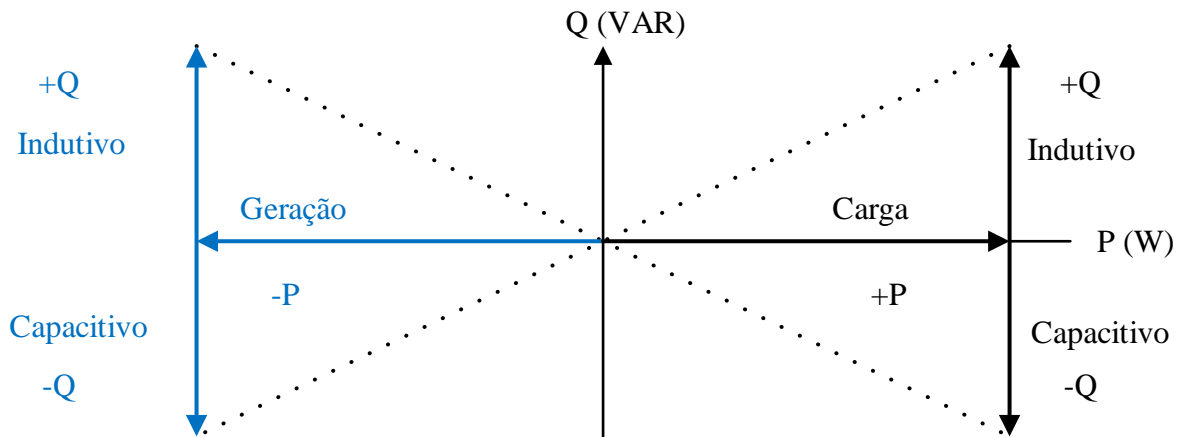


Figura 10: Convenção dos sinais para as potências.

Utilizando a equação (24) e definindo três perfis de variação máxima na tensão quais sejam: 2,5%, 5,0%, 7,5%, é apresentada na Figura 11 a potência máxima que pode ser injetada no PC da Figura 7 em função da sua distância para o secundário do transformador, onde os valores negativos de potência indicam geração. À medida que o PC fica mais distante do transformador, a potência máxima que pode ser inserida respeitando a variação de tensão estabelecida, diminui devido ao aumento da impedância total vista a partir do PC.

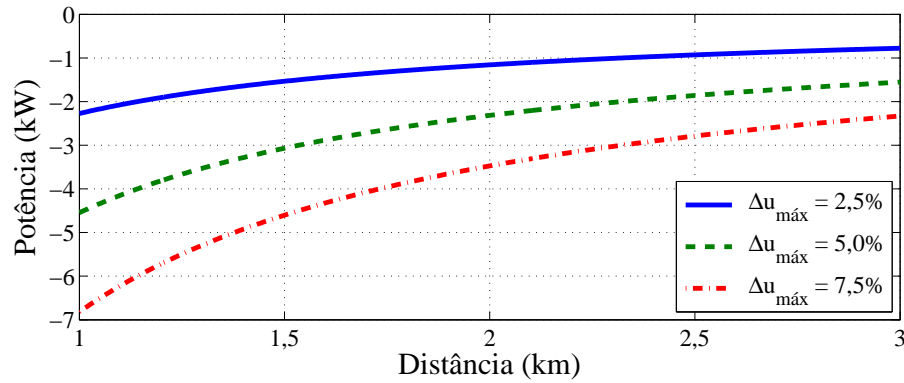


Figura 11: Característica da variação da tensão em função da potência.

Conforme a abordagem feita por Rocabert et al. (2012), em linhas de distribuição com característica predominantemente resistiva, a potência ativa possui influência direta na variação da tensão no PC, e através da equação 26 observa-se a importância dos valores iniciais de tensão e potência para início de análise e a Figura 12 exemplifica o comportamento da micro turbina no cenário ilustrado.

$$V - V_0 = -k_p(P - P_0) \quad (26)$$

onde, V_0 , P_0 são a tensão e a potência inicial, k_p é a constante de inclinação (*droop*) definida para o sistema. Para esta análise ficou definido $P_0 = 0(pu)$ e $V_0 = 1(pu)$ para o PC sem carga e $V_0 = 0,9038(pu)$ com carga, e assim obteve-se $k_p = 0,0062$ o que possibilita desta maneira obter o valor da tensão resultante em função da potência aplicada.

A Figura 12, mostra com clareza e elevação da tensão em função do aumento da potência ativa gerada. A linha sólida apresenta a variação da tensão no PC sem carga, já a linha tracejada mostra a variação da tensão com carga resistiva nominal conectada, nesta situação tem-se uma queda tensão no PC quando não há geração de energia, e à medida que o gerador passa a injetar potência ativa, há uma recuperação da tensão no PC demonstrando a capacidade do gerador em recompor a tensão no PC de acordo com a disponibilidade de potência ativa.

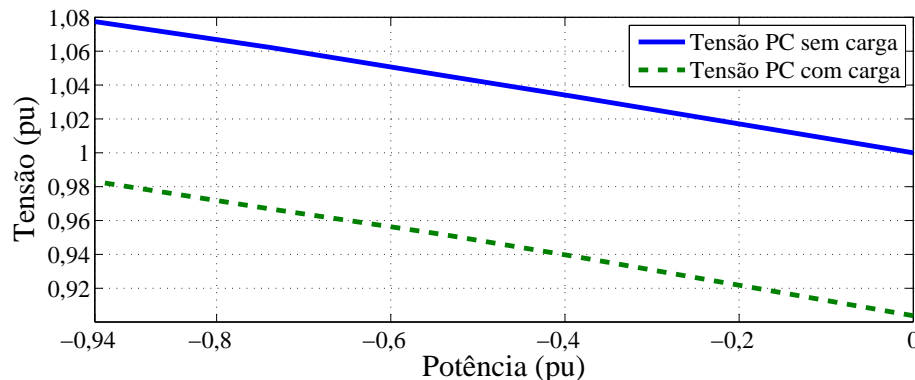


Figura 12: Variação da tensão em função da potência gerada e carga no PC.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Deve ser verificado qual é tipo de geração e a potência instalada para verificar as normas aplicáveis corretamente. Quando a potência é baixa e se enquadra na faixa de micro e minigeração, os procedimentos de distribuição em baixa tensão, dão as diretrizes e valores de referência para o sistema de geração proposto possa ser conectado em uma rede de baixa tensão.

Um cenário típico de uma rede rural é modelado para verificar os efeitos de uma geração eólica com GIDA nesta rede considerada fraca devido sua característica predominantemente resistiva, sendo evidenciado a partir dos gráficos gerados, inclusive verificou-se a variação de tensão no PC que ocorre com a mudança da potência ativa líquida considerada.

4 MODELAGEM DO GIDA

Para realizar um estudo mais profundo conhecendo as características da máquina de indução, é preciso conhecer as equações que descrevem seu funcionamento. Desta maneira é possível determinar as variáveis que influenciam no comportamento da máquina em regime ou durante transitórios. Quando observa-se a máquina de indução duplamente alimentada, percebe-se que ela possui indutâncias variáveis em função do movimento do enrolamento rotórico dificultando a sua análise em eixo estacionário, coordenadas abc , no entanto, transformações algébricas proporcionam uma mudança de variáveis que permitirá uma análise em eixo síncrono, coordenadas qd , eliminando esta variação das indutâncias facilitando o estudo da máquina.

Na Figura 13 é exemplificado a transformação de coordenadas. Nota-se que os eixos d e q , giram numa velocidade ω arbitrária, e neste trabalho será adotado a velocidade síncrona.

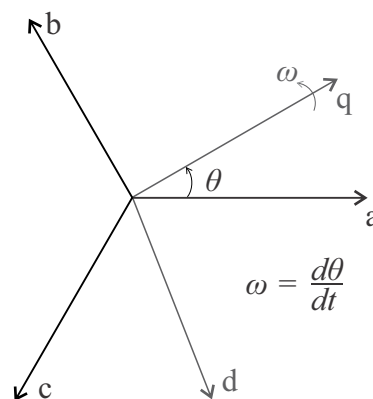


Figura 13: Transformação em eixos síncronos.

Conforme é apresentado por Barbi (1985) e Krause et al. (2002), para realizar o desenvolvimento do modelo matemático no referencial $qd0$, é necessário fazer algumas considerações sobre a máquina para tornar a análise do GIDA menos dispendiosa:

- os enrolamentos trifásicos estatóricos são iguais entre si e dispostos 120° entre si;
- os enrolamentos trifásicos rotóricos são iguais entre si e dispostos 120° entre si;

- considera-se o entreferro constante;
- o circuito magnético é considerado ideal e sem saturação;
- o fluxo magnético no entreferro possui distribuição da densidade de forma radial e senoidal;

Desta forma, será apresentado na seção 4.1, as equações responsáveis pela simplificação das equações para estudo e simulação do GIDA.

4.1 A TRANSFORMAÇÃO DE *PARK* APLICADA AO GIDA

A transformação de variáveis como a transformada de *Park*, permite eliminar equações oscilantes no tempo. Esta transformação pode ser aplicada nas equações da máquina tanto para variáveis do estator e do rotor, porém é mais conveniente utilizar uma transformação de variáveis do rotor e outra para variáveis do estator (KRAUSE et al., 2002).

Esta transformação pode ser expressa como:

$$\mathbf{f}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abc_s} \quad (27)$$

onde

$$(\mathbf{f}_{qd0s})^T = \begin{bmatrix} f_{qs} & f_{ds} & f_{0s} \end{bmatrix}, \quad (28)$$

$$(\mathbf{f}_{abc_s})^T = \begin{bmatrix} f_{as} & f_{bs} & f_{cs} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$\mathbf{K}_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0), \quad (31)$$

a velocidade angular ω e o deslocamento angular θ são relacionados através da equação (31) com ξ sendo apenas uma variável de integração, \mathbf{f}_{qd0s} , \mathbf{f}_{abc_s} podem ser funções que expressam as tensões, correntes ou fluxos em eixos síncronos $qd0$ e em eixos estacionários abc , respectivamente. Já a matriz \mathbf{K}_s é a responsável pela transformação de abc para $qd0$ sendo invariante em tensão.

É possível definir uma transformação para as variáveis rotóricas a fim de completar o conjunto de equações para descrever o comportamento do GIDA. A transformação linear utilizada é expressa nas equações a seguir:

$$\mathbf{f}_{qd0r} = \mathbf{K}_r \mathbf{f}_{abc_r} \quad (32)$$

$$(\mathbf{f}_{qd0r})^T = \begin{bmatrix} f_{qr} & f_{dr} & f_{0r} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$(\mathbf{f}_{abc_r})^T = \begin{bmatrix} f_{ar} & f_{br} & f_{cr} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{K}_r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\beta) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (36)$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta_r(0) \quad (37)$$

com ω_r sendo a velocidade angular do rotor.

4.2 EQUAÇÕES DAS TENSÕES NO REFERENCIAL SÍNCRONO

Com o objetivo da obtenção das equações de tensão em eixos síncronos $qd0$, primeiro deve-se obter as equações de tensão do estator e rotor em abc . O circuito equivalente apresentado na Figura 14 junto a aplicação das leis de *Kirchhoff*, são utilizados para obter as equações (38) e (39) em coordenadas abc .

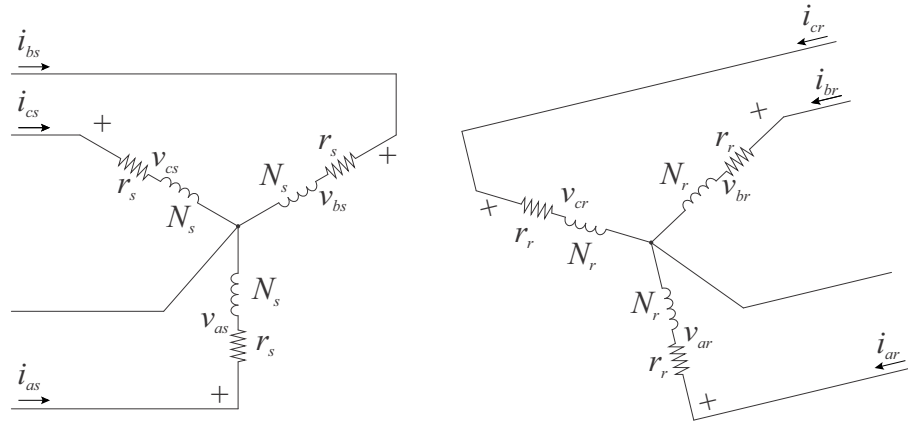


Figura 14: Circuito elétrico equivalente do GIDA.

$$\mathbf{v}_{abc_s} = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{abc_s} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc_s} \quad (38)$$

$$\mathbf{v}_{abc_r} = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_{abc_r} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc_r} \quad (39)$$

as equações (38) e (39) referem-se ao estator e rotor respectivamente, sendo:

$$\mathbf{v}_{abc_s} = \begin{bmatrix} v_{a_s} & v_{b_s} & v_{c_s} \end{bmatrix}^T, \quad (40)$$

$$\mathbf{v}_{abc_r} = \begin{bmatrix} v_{a_r} & v_{b_r} & v_{c_r} \end{bmatrix}^T, \quad (41)$$

$$\mathbf{i}_{abc_s} = \begin{bmatrix} i_{a_s} & i_{b_s} & i_{c_s} \end{bmatrix}^T, \quad (42)$$

$$\mathbf{i}_{abc_r} = \begin{bmatrix} i_{a_r} & i_{b_r} & i_{c_r} \end{bmatrix}^T, \quad (43)$$

as tensões e correntes expressas em sistema trifásico de coordenadas abc .

As matrizes \mathbf{R}_s e \mathbf{R}_r são diagonais e representam a resistência do enrolamento do estator e do rotor respectivamente e são expressas por (44) e (45):

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad (44)$$

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, \quad (45)$$

Nas equações (38) e (39), λ_{abc_s} e λ_{abc_r} representam o fluxo envolvido entre os circuitos do estator e rotor e são descritos por:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc_s} \\ \lambda_{abc_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc_s} \\ \mathbf{i}_{abc_r} \end{bmatrix}, \quad (46)$$

onde as matrizes \mathbf{L}_s , \mathbf{L}_r e \mathbf{L}_{sr} , representam as indutâncias do estator, rotor e a indutância mútua, respectivamente. Conforme é descrito por (KRAUSE et al., 2002), estas indutâncias são representadas por:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}, \quad (47)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix}, \quad (48)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix}, \quad (49)$$

para estas matrizes de indutâncias temos que L_{ls} e L_{ms} são as indutâncias de dispersão e magnetização do estator; L_{lr} e L_{mr} são as indutâncias de dispersão e magnetização do rotor; L_{sr} é amplitude da indutância entre os enrolamentos do estator e rotor.

Com o objetivo de facilitar a análise do GIDA as equações de tensão com variáveis do rotor serão agora referidas ao estator utilizando as seguintes relações:

$$\mathbf{i}'_{abc_r} = \frac{N_r}{N_s} \mathbf{i}_{abc_r}, \quad (50)$$

$$\mathbf{v}'_{abc_r} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{v}_{abc_r}, \quad (51)$$

$$\lambda'_{abc_r} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abc_r}, \quad (52)$$

sendo N_s e N_r o número de espiras da bobina do estator e rotor respectivamente, o símbolo (') representa a variável referida ao estator. Tem-se ainda que as indutância de magnetização e mútua estão sobre a influência do mesmo fluxo magnético e por isso obtém-se segundo Krause et al. (2002):

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr}, \quad (53)$$

definindo ainda que:

$$\mathbf{L}'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{L}_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (54)$$

tem-se ainda,

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s} \right)^2 L_{ms} \quad (55)$$

como tem-se:

$$\mathbf{L}'_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \mathbf{L}_r \quad (56)$$

e através da equação (48) chega-se a:

$$\mathbf{L}'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (57)$$

onde,

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr} \quad (58)$$

Ao substituir as equações (50), (52), (54) e (57) em (46) chega-se a representação do fluxo da máquina refletido ao estator, dado por:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc_s} \\ \lambda'_{abc_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc_s} \\ \mathbf{i}'_{abc_r} \end{bmatrix} \quad (59)$$

Substituindo a equação (59) em (38) e (39), as equações das tensões refletidas para o estator tornam-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc_s} \\ \mathbf{v}'_{abc_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s + \frac{d}{dt} \mathbf{L}_s & \frac{d}{dt} \mathbf{L}'_{sr} \\ \frac{d}{dt} (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{R}'_r + \frac{d}{dt} \mathbf{L}'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc_s} \\ \mathbf{i}'_{abc_r} \end{bmatrix}, \quad (60)$$

onde,

$$\mathbf{R}'_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \mathbf{R}_r \quad (61)$$

Após aplicar as transformações descritas por (30) e (35) obtém-se as equações das tensões no referencial $qd0$, conforme é apresentado na sequência.

$$\mathbf{v}_{qd0_s} = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{qd0_s} + \omega \lambda_{dq_s} + \dot{\lambda}_{qd0_s} \quad (62)$$

$$\mathbf{v}'_{qd0_r} = \mathbf{R}'_r \mathbf{i}'_{qd0_r} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dq_r} + \dot{\lambda}'_{qd0_r} \quad (63)$$

sendo,

$$\lambda_{dq_s} = \begin{bmatrix} \lambda_{d_s} & -\lambda_{q_s} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (64)$$

$$\lambda_{dq_r} = \begin{bmatrix} \lambda'_{d_r} & -\lambda'_{q_r} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (65)$$

As equações (62) e (63) ficam melhor explicadas com a determinação do fluxo, e para circuitos magneticamente lineares obtemos:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0_s} \\ \lambda'_{qd0_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s \mathbf{L}_s \mathbf{K}_s^{-1} & \mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{K}_r^{-1} \\ \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T \mathbf{K}_s^{-1} & \mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r \mathbf{K}_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{qd0_s} \\ \mathbf{i}'_{qd0_r} \end{bmatrix} \quad (66)$$

Resolvendo as submatrizes apresentadas em (66), obtemos:

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}_s \mathbf{K}_s^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (67)$$

$$\mathbf{K}_r \mathbf{L}_r \mathbf{K}_r^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{K}_r^{-1} = \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T \mathbf{K}_s^{-1} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (69)$$

onde,

$$M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (70)$$

Desta forma a equação (66) pode ser expandida e apresentada como:

$$\lambda_{q_s} = (L_{l_s} + M) i_{q_s} + M i'_{q_r} \quad (71)$$

$$\lambda_{d_s} = (L_{l_s} + M) i_{d_s} + M i'_{d_r} \quad (72)$$

$$\lambda_{0_s} = L_{l_s} i_{0_s} \quad (73)$$

$$\lambda'_{q_r} = (L'_{lr} + M) i'_{q_r} + M i_{q_s} \quad (74)$$

$$\lambda'_{d_r} = (L'_{lr} + M) i'_{d_r} + M i_{d_s} \quad (75)$$

$$\lambda'_{0_r} = L'_{lr} i'_{0_r} \quad (76)$$

Pode-se expressar as equações de tensão da máquina no referencial arbitrário conforme segue:

$$v_{q_s} = R_s i_{q_s} + \omega \lambda_{d_s} + \dot{\lambda}_{q_s} \quad (77)$$

$$v_{d_s} = R_s i_{d_s} - \omega \lambda_{q_s} + \dot{\lambda}_{d_s} \quad (78)$$

$$v_{0_s} = R_s i_{0_s} + \dot{\lambda}_{0_s} \quad (79)$$

$$v'_{q_r} = R'_r i'_{q_r} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{d_r} + \dot{\lambda}'_{q_r} \quad (80)$$

$$v'_{d_r} = R'_r i'_{d_r} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{q_r} + \dot{\lambda}'_{d_r} \quad (81)$$

$$v'_{0_r} = R'_r i'_{0_r} + \dot{\lambda}'_{0_r} \quad (82)$$

4.3 REFERENCIAL NO FLUXO ESTATÓRICO

A partir das equações (77) - (82) é possível definir qual orientação deve ser dada para elas e de acordo com Bim (2014), orientar estas equações no referencial do fluxo estatórico, permite controlar as potências ativa (P_s) e reativa (Q_s) do estator de forma independente. É necessário fazer uma substituição que transformará as equações do referencial arbitrário para o

referencial do fluxo estatórico substituindo ω por ω_e (velocidade angular do fluxo estatórico).

A Figura 15 mostra a configuração no referencial do fluxo estatórico com f sendo funções genéricas, tensão ou corrente, onde negligenciando a resistência do estator, observa-se o vetor de tensão adiantado 90° em relação ao vetor fluxo, na prática, há um pequeno erro devido a queda de tensão na resistência estatórica (MARQUES, 2004; LIMA, 2009; LI et al., 2009).

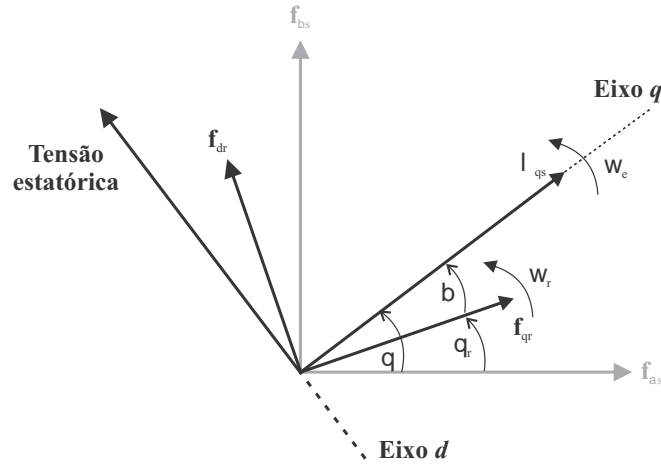


Figura 15: Referencial do fluxo estatórico para as variáveis do rotor e estator.

A posição do fluxo estatórico (θ_e), será obtido a partir da transformação das tensões v_{abc} em $v_{\alpha\beta}$ de acordo com a equação (83):

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad (83)$$

a partir de $v_{\alpha\beta}$, determina-se θ_e através de (84):

$$\theta_e = \tan^{-1} \left(\frac{v_\beta}{v_\alpha} \right) + \frac{\pi}{2} \quad (84)$$

Por se tratar de um sistema equilibrado, a componente homopolar é nula e definido o referencial no fluxo estatórico, é possível reescrever as equações de tensão e fluxo da máquina considerando $\lambda_{ds} = 0$, desta forma obtêm-se:

$$v_{q_s} = R_s i_{q_s} + \dot{\lambda}_{q_s} \quad (85)$$

$$v_{d_s} = R_s i_{d_s} - \omega_e \lambda_{q_s} \quad (86)$$

$$v'_{q_r} = R'_r i'_{q_r} + (\omega_e - \omega_r) \lambda'_{d_r} + \dot{\lambda}'_{q_r} \quad (87)$$

$$v'_{dr} = R'_r i'_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda'_{qr} + \dot{\lambda}'_{dr} \quad (88)$$

De maneira semelhante, as equações para o fluxo no referencial do fluxo estático podem ser reescritas como:

$$\lambda_{qs} = (L_{ls} + M) i_{qs} + M i'_{qr} \quad (89)$$

$$0 = (L_{ls} + M) i_{ds} + M i'_{dr} \quad (90)$$

$$\lambda'_{qr} = (L'_{lr} + M) i'_{qr} + M i_{qs} \quad (91)$$

$$\lambda'_{dr} = (L'_{lr} + M) i'_{dr} + M i_{ds} \quad (92)$$

Reescrevendo as equações (85) - (92) para deixar explícitas as variáveis para controle que são as correntes rotóricas, chega-se a (93) e (94):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i'_{qr} = & \left(\frac{R_s M}{\lambda_{qs} (M + L_{ls})} i'_{dr} + \omega_r + \frac{v_{ds}}{\lambda_{qs}} \right) i'_{dr} + \\ & \frac{1}{L_{eq}} \left[v'_{qr} - \left(\frac{R_s M^2}{(M + L_{ls})^2} + R'_r \right) i'_{qr} + \frac{R_s M}{(M + L_{ls})^2} \lambda_{qs} - \frac{M}{M + L_{ls}} v_{qs} \right] \end{aligned} \quad (93)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i'_{dr} = & - \left(\frac{R_s M}{\lambda_{qs} (M + L_{ls})} i'_{dr} + \omega_r + \frac{v_{ds}}{\lambda_{qs}} \right) i'_{qr} + \\ & \frac{1}{L_{eq}} \left[v'_{dr} - \left(\frac{R_s M^2}{(M + L_{ls})^2} + R'_r \right) i'_{dr} - \frac{M}{M + L_{ls}} \omega_r \lambda_{qs} - \frac{M}{M + L_{ls}} v_{ds} \right] \end{aligned} \quad (94)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{qs} = v_{qs} - \frac{R_s}{M + L_{ls}} \lambda_{qs} + \frac{R_s M}{M + L_{ls}} i'_{qr} \quad (95)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta \theta = - \frac{v_{ds}}{\lambda_{qs}} - \frac{R_s M}{(M + L_{ls}) \lambda_{qs}} i'_{dr} - \omega_s \quad (96)$$

onde,

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{M + L_{ls}}{L'_{lr} M + L_{ls} M + L'_{lr} L_{ls}} \quad (97)$$

$$\Delta \theta = \theta_e - \theta_s \quad (98)$$

As equações (93 - 96) descrevem o comportamento da máquina revelando sua característica não linear, elas serão utilizadas no projeto do controlador que será apresentado no Capítulo 5.

Com as equações apresentadas é possível determinar a corrente de magnetização da máquina, corrente esta necessária para induzir no estator a amplitude correta a realizar a conexão do GIDA no PC. A partir da equação (86), considerando ainda antes de conectar o estator ao PC, a corrente i_{d_s} é nula e chega-se a:

$$v_{d_s} = -\omega_e \lambda_{q_s} \quad (99)$$

A partir da equação (89), considerando também antes de conectar o estator, têm-se $i_{q_s} = 0$, resultando em:

$$\lambda_{q_s} = M i'_{qr} \quad (100)$$

Substituindo (99) em (100), e ainda, isolando i'_{qr} , obtém-se:

$$i'_{qr} = \frac{-v_{d_s}}{\omega_e M} \quad (101)$$

Com a equação (101), determina-se a quantidade de corrente que é necessária inserir no rotor do GIDA para obter a magnetização adequada para realizar a conexão.

4.4 EQUAÇÕES DE TORQUE E POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

Segundo Krause et al. (2002) o torque eletromagnético para a máquina simétrica é expresso por:

$$T_e = \left(\frac{p}{2}\right) \begin{bmatrix} i_{a_s} & i_{b_s} & i_{c_s} \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{sr}] \begin{bmatrix} i'_{a_r} \\ i'_{b_r} \\ i'_{c_r} \end{bmatrix} \quad (102)$$

onde p é o número de polos da máquina. A equação 102 pode ser definida para o referencial genérico com o uso adequado das matrizes de transformação \mathbf{K}_s e \mathbf{K}_r obtendo deste modo a seguinte representação:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) M (i_{q_s} i'_{d_r} - i_{d_s} i'_{q_r}) \quad (103)$$

de forma equivalente, substituindo as equações (71 - 72) e (74 - 75) na equação (103) obtém-se:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\lambda_{d_s} i_{q_s} - \lambda_{q_s} i_{d_s}) \quad (104)$$

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) (\lambda'_{q_r} i'_{d_r} - \lambda'_{d_r} i'_{q_r}) \quad (105)$$

Isolando a corrente estatórica das equações (89) e (90), obtém-se as equações (106) e (107):

$$i_{d_s} = -\frac{M}{L_{l_s} + M} i'_{d_r} \quad (106)$$

$$i_{q_s} = \frac{\lambda_{q_s} - M i'_{q_r}}{L_{l_s} + M} \quad (107)$$

Como $\lambda_{d_s} = 0$ e ainda substituindo a equação (106) em (104), o torque eletromagnético pode ser reescrito como:

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) \left(\frac{M}{L_{l_s} + M} \lambda_{q_s} i'_{d_r}\right) \quad (108)$$

A equação (108) mostra que é possível controlar o torque da máquina através da corrente do rotor de eixo direto, desde que o fluxo permaneça constante (LIMA, 2009). Para o caso da máquina operando como gerador, o ideal é controlar a potência do estator, desta forma faz-se necessário conhecer estas equações.

Segundo Krause et al. (2002, p.536), a potência do estator e rotor pode ser calculada conforme as equações (109) e (110):

$$\begin{bmatrix} P_s \\ Q_s \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} i_{q_s} & i_{d_s} \\ i_{d_s} & -i_{q_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{q_s} \\ v_{d_s} \end{bmatrix} \quad (109)$$

$$\begin{bmatrix} P_r \\ Q_r \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} i_{q_r} & i_{d_r} \\ i_{d_r} & -i_{q_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{q_r} \\ v_{d_r} \end{bmatrix} \quad (110)$$

Considerando a tensão da rede com amplitude e frequência estáveis, oriundos do sistema equilibrado definido para este trabalho, implica que a partir da transformação para eixo síncrono utilizando a equação (30), $v_{q_s} = 0$ e portanto é possível simplificar o cálculo de potência da equação (109). Substituindo as equações (106) e (107) em (109) obtém-se:

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{M}{L_{l_s} + M} v_{d_s} i'_{d_r} \quad (111)$$

$$Q_s = -\frac{3}{2} \frac{v_{d_s} (\lambda_{q_s} - M i'_{q_r})}{L_{l_s} + M} \quad (112)$$

Obter as equações de potência ativa e reativa e observar a possibilidade de controle desacoplado, mostra a praticidade na etapa de controle. Como as correntes de eixo d e q , controlam respectivamente, potência ativa e reativa, será possível projetar malhas de controle de correntes para proporcionar o controle destas potências e assim, contribuir com a regulação de tensão no PC.

4.5 CAPABILIDADE DO GIDA

É importante verificar a capacidade do gerador em fornecer reativos e potência ativa. A análise da máquina proporciona então verificar o limite de potência reativa disponível tanto capacitiva quanto indutiva. No GIDA utilizado neste trabalho será verificado sua grande capacidade de fornecimento de reativo indutivo e baixa capacidade em capacitivo devido a sua elevada corrente de magnetização. Apesar de a operação normal do GSC ser com FP unitário, também será considerada na análise da capacidade do GSC fornecer reativos sem a necessidade de sobredimensionamento.

A curva de capacidade que é exibida na Figura 16 deriva das equações (109) e (110), que expressam as potências envolvidas no funcionamento da micro turbina, sendo elas: potências ativa e reativa do estator e rotor, respectivamente. Conhecendo a potência ativa do estator (P_s) que é dada a partir de uma tabela de MPPT, e os valores de tensão da rede, o objetivo é então calcular as demais grandezas obtendo o limite de operação em função das correntes rotóricas e estatóricas (LUND et al., 2007; ENGELHARDT et al., 2011; TIAN et al., 2013; KIM et al., 2016).

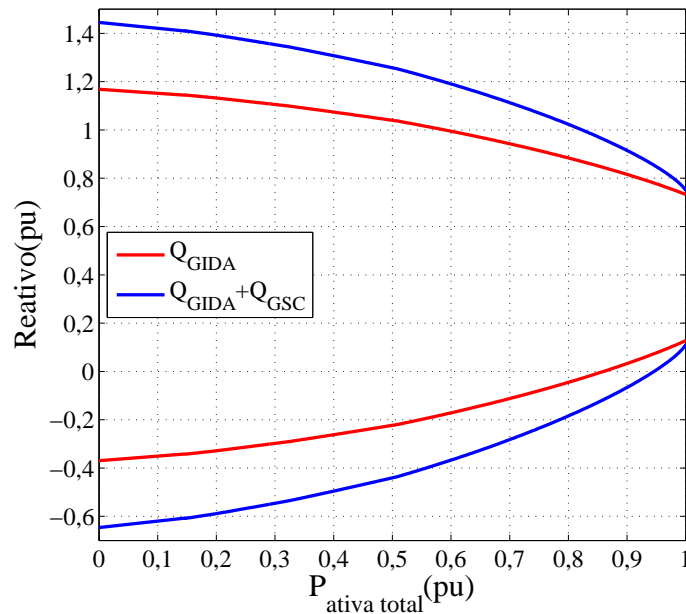


Figura 16: Curva de capacidade da micro turbina eólica equipada com GIDA.

De maneira clara observa-se na Figura 16, que a micro turbina eólica é capaz de fornecer reativos a rede elétrica e a inclusão da capacidade nominal do conversor GSC, garante um aumento da capacidade de inserção de reativos. Destaca-se o fato de que não há necessidade de sobre dimensionamento do conversor para realizar este tipo de operação.

Outra característica notável é a diferença entre o reativo indutivo (valores positivos) e reativo capacitivo (valores negativos), devido a alta corrente de magnetização necessária ao GIDA, fica reduzida a capacidade da máquina em fornecer energia capacitiva.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do modelo da máquina assíncrona na referência do fluxo estatórico, é vantajoso por eliminar a variação das indutâncias com relação as variáveis em eixo estacionário *abc*, outra vantagem da modelagem em eixo síncrono é a possibilidade de controlar a potência ativa e reativa do estator da máquina de maneira desacoplada, desta forma as correntes rotóricas tornam-se as variáveis de controle de interesse.

5 PROJETO DO CONTROLADOR

5.1 INTRODUÇÃO

A modelagem matemática do GIDA desenvolvida no capítulo 4 apresenta as características dinâmicas da máquina em função das correntes rotóricas, sendo utilizadas para o projeto do controlador proporcional e integral (PI).

Diversas estratégias de controle vem sendo desenvolvidas para o GIDA e o controle PI é o mais utilizado. Este método de controle clássico possui boa resposta dinâmica para controlar as correntes rotóricas em um sistema de tensão equilibrada e sem distúrbios (COSTA, 2010).

Utilizando controladores PI, Ko et al. (2007) propõem controlar a tensão no ponto de conexão de um GIDA em um local remoto, atuando sobre o conversor *back-to-back* de maneira a modificar as potências reativas tanto do GSC quanto do RSC. Para esse modo de operação é fundamental cuidar para não ultrapassar os limites de potência aparente do conversor, para resolver esta condição, uma equação de limitação às novas referências de potências é implementada junto ao controlador.

Considerando uma rede elétrica em condições normais de operação, é possível utilizar uma estratégia de controle no GIDA que proporcione a regulação de tensão contribuindo para a qualidade de energia da rede elétrica principalmente em locais remotos. Nesta abordagem, o algoritmo compara a tensão no ponto de conexão com o seu valor de referência e atua no GSC alterando a corrente de referência do eixo em quadratura, de forma a controlar os reativos trocados entre o conversor e a rede, contribuindo para a regulação da tensão (NAIDU; SINGH, 2014).

5.2 CONTROLADOR DAS CORRENTES ROTÓRICAS

O RSC será responsável pelo controle da potência ativa e reativa do estator conforme já abordado anteriormente. É necessário realizar o projeto de controle das correntes rotóricas para efetivar o controle destas potências que são calculadas pelas equações (111) e (112).

Com o desenvolvimento matemático apresentado no capítulo 4 realizado em eixos síncronos e orientado ao fluxo do estator, ao considerarmos $R_s \approx 0$ pode-se simplificar as equações (93) e (94) (MARQUES, 2004). Desta maneira obtém-se as equações a seguir:

$$\frac{d}{dt}i'_{qr} = \left(\omega_r + \frac{v_{ds}}{\lambda_{qs}} \right) i'_{dr} - \frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{qr} + \frac{v'_{qr}}{L_{eq}} - \frac{M}{L_{eq}(M + L_{ls})} v_{qs} \quad (113)$$

$$\frac{d}{dt}i'_{dr} = - \left(\omega_r + \frac{v_{ds}}{\lambda_{qs}} \right) i'_{qr} - \frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{dr} + \frac{v'_{dr}}{L_{eq}} - \frac{M}{L_{eq}(M + L_{ls})} (\omega_r \lambda_{qs} + v_{ds}) \quad (114)$$

Substituindo a equação (89) em (113) e (114) chega-se a:

$$\frac{d}{dt}i'_{qr} = (\omega_r - \omega_e) i'_{dr} - \frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{qr} + \frac{v'_{qr}}{L_{eq}} - \frac{M}{L_{eq}(M + L_{ls})} v_{qs} \quad (115)$$

$$\frac{d}{dt}i'_{dr} = -(\omega_r - \omega_e) i'_{qr} - \frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{dr} + \frac{v'_{dr}}{L_{eq}} - \frac{M}{L_{eq}(M + L_{ls})} (\omega_r \lambda_{qs} + v_{ds}) \quad (116)$$

As equações (115) e (116) apresentam um acoplamento entre as malhas de corrente, mas como essas parcelas são proporcionais ao escorregamento, podendo chegar a no máximo 30%, elas então são desprezadas (DATTA; RANGANATHAN, 1999; LIMA, 2009). Desta maneira obtém-se:

$$\frac{d}{dt}i'_{qr} = -\frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{qr} + \frac{v'_{qr}}{L_{eq}} - \frac{M}{L_{eq}(M + L_{ls})} v_{qs} \quad (117)$$

$$\frac{d}{dt}i'_{dr} = -\frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{dr} + \frac{v'_{dr}}{L_{eq}} - \frac{M}{L_{eq}(M + L_{ls})} (\omega_r \lambda_{qs} + v_{ds}) \quad (118)$$

Da equação (117) considerando a rede elétrica como distúrbio, chega-se a:

$$\frac{d}{dt}i'_{qr} = -\frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{qr} + \frac{v'_{qr}}{L_{eq}} \quad (119)$$

Substituindo (86) em (118),

$$\frac{d}{dt}i'_{dr} = -\frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{dr} + \frac{v'_{dr}}{L_{eq}} - \frac{M \lambda_{qs}}{L_{eq}(M + L_{ls})} (\omega_r - \omega_e), \quad (120)$$

considerando novamente que a parcela do escorregamento em (120) é pequena, obtém-se:

$$\frac{d}{dt}i'_{dr} = -\frac{R'_r}{L_{eq}} i'_{dr} + \frac{v'_{dr}}{L_{eq}} \quad (121)$$

Este sistema descrito pelas equações (119) e (121) é linear e invariante no tempo, deste modo poderá ser realizado o projeto do controlador PI utilizando uma técnica clássica. Portanto

deve-se reescrever o sistema sob a forma de função de transferência descrita por:

$$G(s) = \frac{i'_{qr}(s)}{v'_{qr}(s)} = \frac{1}{sL_{eq} + R'_r} \quad (122)$$

Utilizando a técnica de projeto do controlador PI descrita por Marques (2004), considera-se que o zero do controlador PI cancelará o pólo de (122) e os ganhos do controlador PI de eixo q serão calculados pelas seguintes equações:

$$K_{iq} = B_{wq}R'_r \quad (123)$$

$$K_{pq} = B_{wq}L_{eq} \quad (124)$$

com B_w sendo a banda passante em malha fechada do sistema. De maneira semelhante determina-se os ganhos do controlador PI para o eixo d :

$$K_{id} = B_{wd}R'_r \quad (125)$$

$$K_{pd} = B_{wd}L_{eq} \quad (126)$$

Utilizando os parâmetros da máquina que foram determinados experimentalmente bem como a análise da banda passante realizada por Marques (2004), será utilizado $B_\omega = 500 \text{ rad/s}$ e com isso tem-se os ganhos do controlador igual a:

$$K_i = 600,5$$

$$K_p = 6,799$$

Estes ganhos são utilizados tanto para o eixo d , quanto para o eixo q . Com a banda passante muito baixa reduzem-se as oscilações do fluxo estatórico, mas acaba por interferir no projeto da malha de potência, evita-se este problema com a banda passante escolhida (MARQUES, 2004).

5.3 CONTROLADOR DE POTÊNCIA

A potência reativa é controlada de forma indireta, em função da tensão no PC, proporcionando maior liberdade no controle de tensão dentro dos limites da micro turbina e prioriza o fornecimento de potência ativa ao máximo, reduzindo as oscilações de tensão dentro dos limites estabelecidos como adequados pelo PRODIST. Para a potência ativa, uma tabela de MPPT é utilizada para simplificar a implementação e o controle PI é implementado no sistema.

O projeto do controle de potência ativa foi realizado por uma técnica clássica, conhecida como método de *Ziegler-Nichols* muito utilizada devido sua simplicidade de uso. Esse método foi utilizado no trabalho de Marques (2004) e é devidamente relatada por Åström K. J.m e Hägglund (1995).

O método de resposta ao degrau será utilizado neste trabalho e consiste em realizar um teste a malha aberta do sistema e registrar dois parâmetros. Com base na resposta do sistema, o ponto de máxima inclinação é encontrado e uma reta tangente é desenhada, de modo que a intersecção desta com os eixos das abscissas e ordenadas, determinam os parâmetros a e L . O resultado a malha aberta do degrau dado no instante 0,3s é exibido na Figura 17.

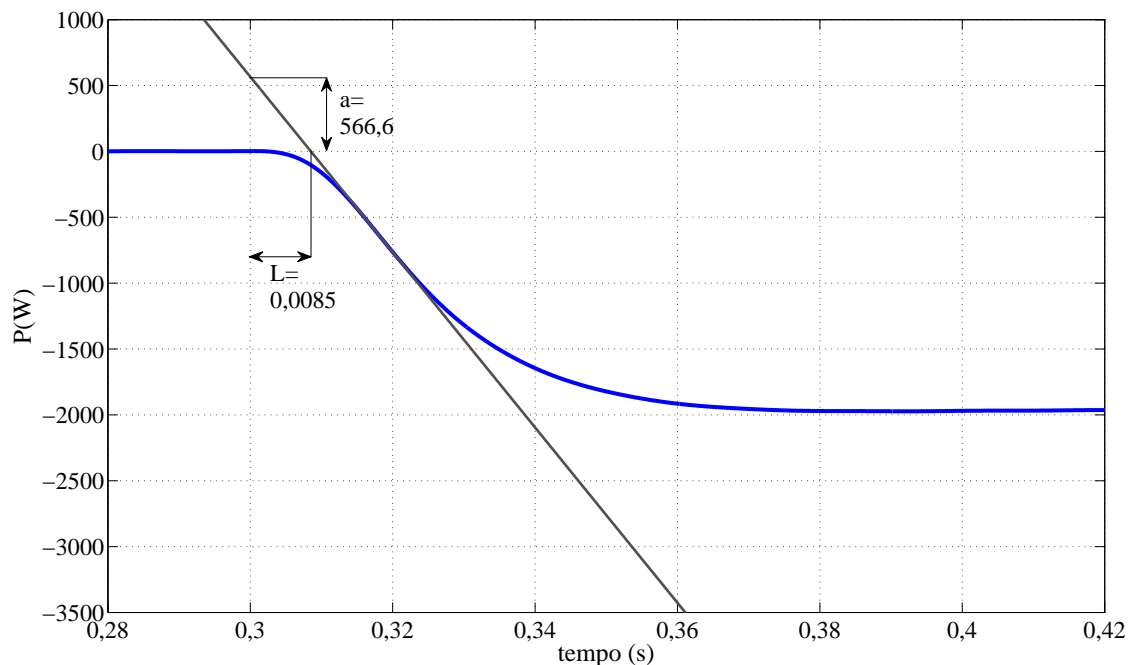


Figura 17: Determinação do ganho da malha de controle de potência ativa.

Com a utilização do método de *Ziegler-Nichols* de resposta ao degrau em malha aberta, através da Tabela 5 obtém-se de forma direta os parâmetros do controlador, seja ele P, PI, ou PID.

Tabela 5: Parâmetros controlador PID pelo método de *Ziegler-Nichols* a malha aberta.

Controlador	K	T_i	T_d
P	$1/a$		
PI	$0,9/a$	$3L$	
PID	$1,2/a$	$2L$	$L/2$

Desta forma pode-se determinar os ganhos da malha de potência ativa K_{iP} e K_{pP} a ser utilizado no controlador:

$$K_{iP} = 62,291 \times 10^{-3} \quad (129)$$

$$K_{pP} = 1,588 \times 10^{-3} \quad (130)$$

A estrutura de controle proposta é apresentada na Figura 18 onde identifica-se as malhas internas de corrente e externa de potência. A referência de potência ativa é proveniente de uma tabela MPPT, que de acordo com a velocidade em que opera o GIDA traz um novo valor, já a referência de potência reativa é determinada para manter o FP indutivo requerido.

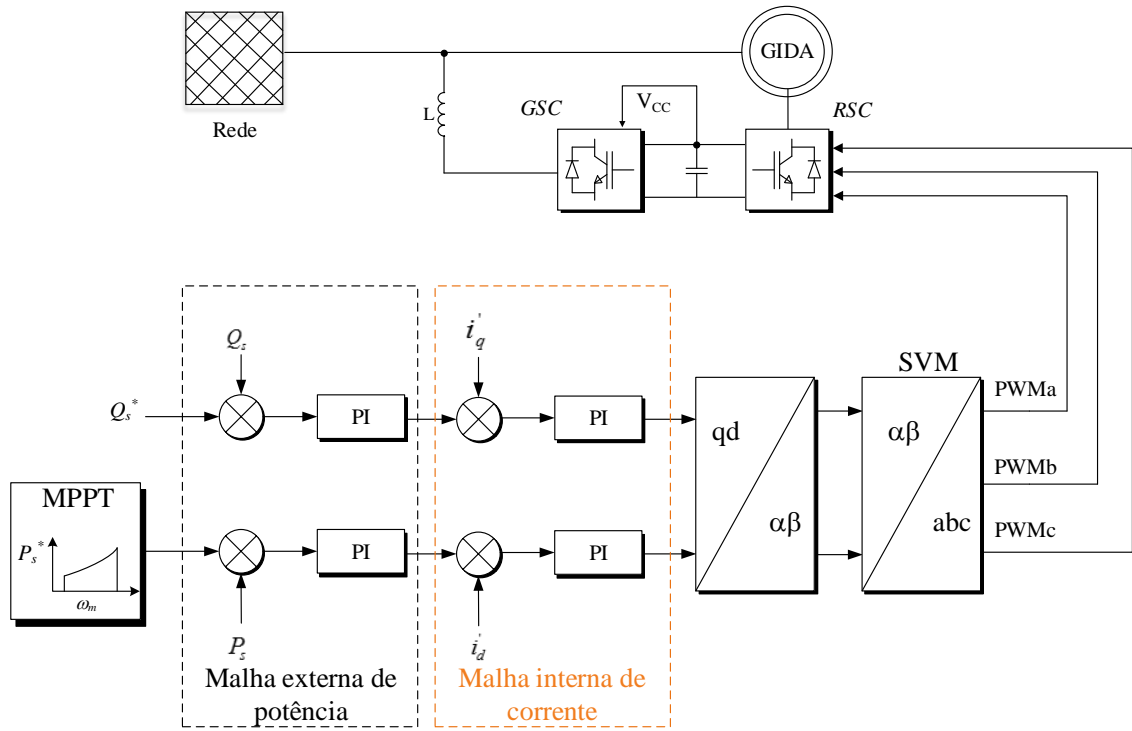


Figura 18: Diagrama de blocos do sistema proposto.

A potência reativa de referência (Q_s^*), será definida a partir do valor atual de referência da potência ativa e do fator de potência, para isto uma equação que descreva esta relação deve ser obtida. Sabe-se que:

$$Q = S \sin(\varphi) \quad (131)$$

ainda,

$$S = \frac{P}{FP} \quad (132)$$

e

$$\cos(\varphi) = FP \quad (133)$$

$$\cos(\varphi)^2 + \sin(\varphi)^2 = 1 \quad (134)$$

Substituindo (133) em (134) obtém-se:

$$\sin(\varphi) = \sqrt{1 - FP^2} \quad (135)$$

Finalmente substituindo (132) e (135) em (131) chega-se a equação (136):

$$Q = \frac{P\sqrt{1 - FP^2}}{FP} \quad (136)$$

Desta forma a potência reativa de referência fica dependente do ponto de operação do GIDA e do FP previamente definido.

5.4 CONTROLADOR DO GSC

Na aplicação desta dissertação, o GSC é o responsável por manter a tensão do barramento CC no valor de referência definido. Sua operação dar-se-á por meio de controle vetorial desta forma é possível definir facilmente sua operação com fator de potência unitário utilizando as referências adequadas. A operação do GIDA fará com que a tensão do barramento aumente ou diminua, de modo que as correntes do GSC devam ser controladas para que possam descarregar ou carregar de acordo com esta variação de tensão.

A função de transferência do filtro L pode ser facilmente obtida a partir da análise do circuito da Figura 19, assim sendo, chega-se a representação expressa em (137), com $L_f = 1,65mH$ representando a indutância do filtro e $R_f = 41m\Omega$ a resistência do filtro.

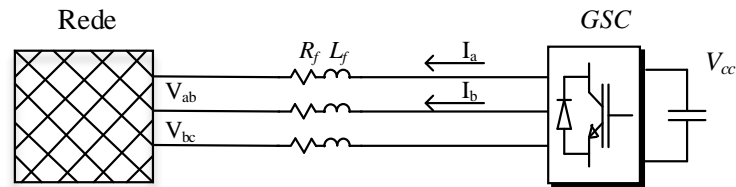


Figura 19: Circuito GSC com o filtro L.

$$G_f = \frac{1}{sL_f + R_f} \quad (137)$$

Duas malhas de correntes são projetadas para o controle em eixos síncronos, desta maneira a corrente de eixo em quadratura $i_{q_{GSC}}$ será mantida em zero para garantir a operação

com fator de potência unitário, já a corrente de eixo direto i_{dGSC} receberá sua referência a partir da malha de tensão. A Figura 20 mostra a estrutura de controle empregada para as correntes. O controlador PI é utilizado e os ganhos proporcional e integral são definidos como: k_{pGSC} , k_{iGSC} respectivamente.

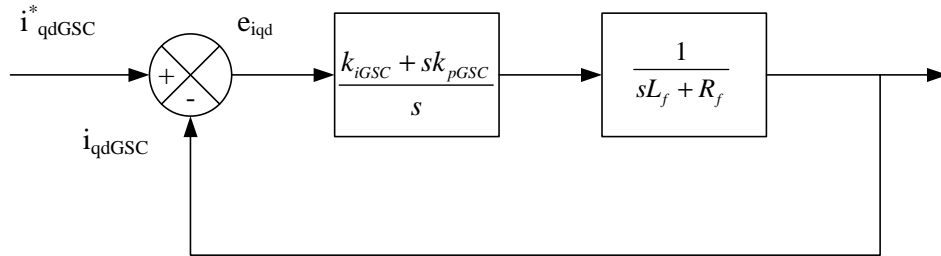


Figura 20: Diagrama de bloco de controle de corrente i_{qdGSC} .

A Figura 21, mostra a estrutura de controle para a malha de tensão, composta pela malha fechada de corrente em eixo direto e a capacitância C utilizada é de $4700\mu F$ representando a conversão do sinal de corrente em tensão. Os ganhos do controlador de corrente são iguais para os eixos em quadratura e direto, desta forma tem-se ainda os ganhos do controlador da malha de tensão: k_{pVcc} , k_{iVcc} .

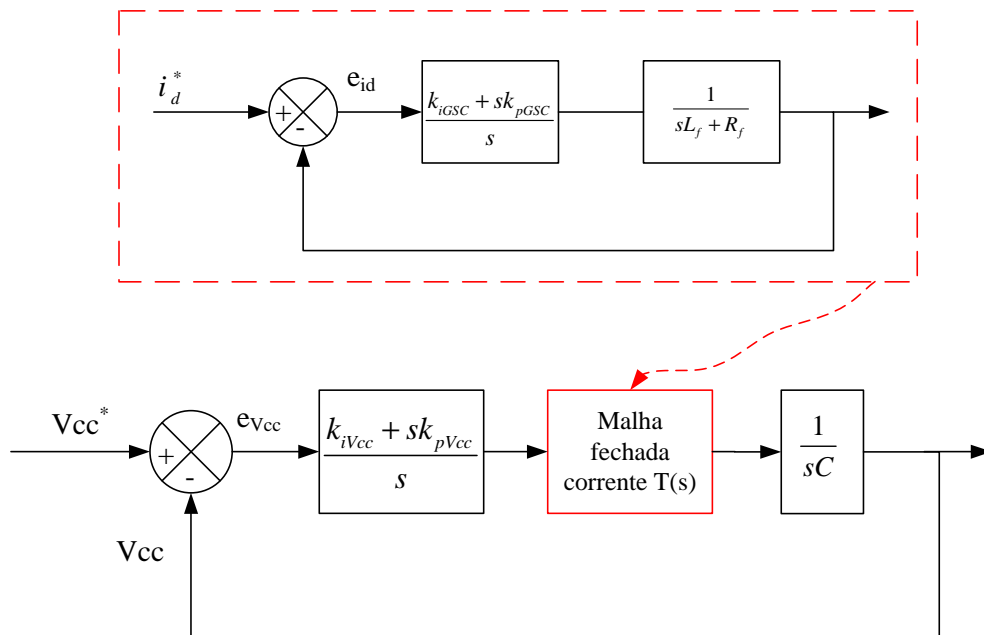
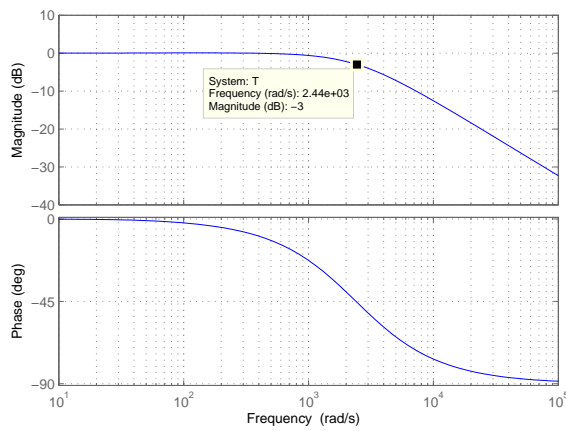


Figura 21: Diagrama de bloco controle de tensão do barramento CC.

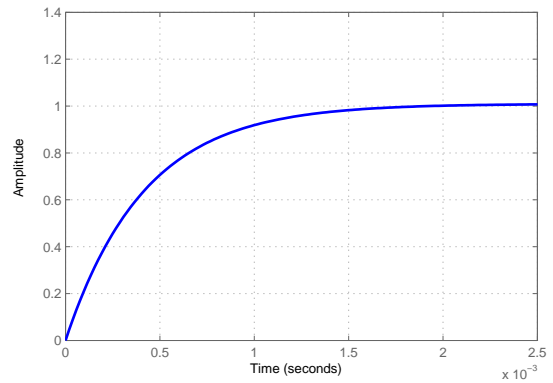
Para garantir o balanço de energia no barramento CC, deseja-se ter malhas de correntes rápidas para obter-se boa resposta com a mudança de referência, no caso de i_{dGSC}^* , já para a malha de tensão espera-se que ela corrija o desvio de tensão do barramento de maneira mais

lenta, alterando a corrente de referência de eixo direto $i_{d_{GSC}}^*$ para carregar ou descarregar o barramento CC adequadamente. Considerando que o presente trabalho analisa o sistema em regime permanente, a operação da malha de tensão de forma mais lenta não é um problema e evita picos de corrente, tornando a operação mais segura.

Utilizando a ferramenta de desenvolvimento *sisotool* do Matlab®, foi então projetado um controlador PI para malha de corrente com uma banda passante de 2440rad/s conforme é apresentado na Figura 22 (a). A resposta ao degrau, observada na Figura 22(b) comprova a velocidade da malha de corrente para os ganhos do controlador obtidos $K_{p_{GSC}} = 4$ e $K_{i_{GSC}} = 200$.



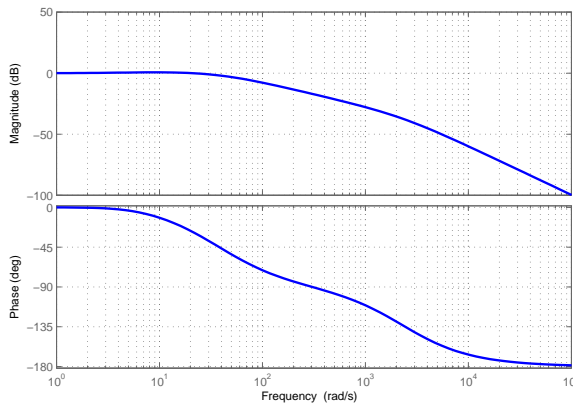
(a) Diagrama de bode.



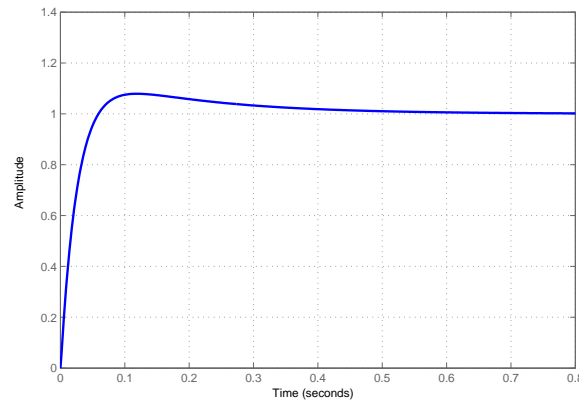
(b) Resposta ao degrau unitário.

Figura 22: Análise malha de corrente do GSC.

Utilizando ainda o *sisotool*, será especificado uma malha de controle lenta para a tensão que gerará a referência de corrente para o eixo direto do sistema. A Figura 23 mostra a resposta do sistema para o controlador com os ganhos de $k_{i_{Vcc}} = 1$ e $k_{p_{Vcc}} = 0,2$ e como o desejado, esta malha de controle está lenta, com resposta ao degrau de aproximadamente 440ms .



(a) Diagrama de bode.



(b) Resposta ao degrau unitário.

Figura 23: Análise da malha de tensão do GSC.

O resultado de simulação utilizando o *software* PSIM®, demonstra a ação destes controladores do GSC operando com frequência de chaveamento e amostragem de $6kHz$. Um procedimento de inicialização com redução de picos de correntes foi utilizado e é exibido na Figura 24. O barramento é pré carregado através da retificação a diodos intrínsecos aos IGBTs e após este momento, a malha de corrente é habilitada com uma pequena corrente ($i_{qGSC}^* = 0pu$ e $i_{dGSC}^* = -0,016pu$) que fará com que o barramento seja carregado até certo nível de tensão, após transcorrido o tempo definido, a malha de tensão será habilitada e sua referência inicial será o valor de tensão atual para estabilizar o controle e por fim a referência de regime permanente será ativada para operação normal do conversor e do sistema eólico em estudo.

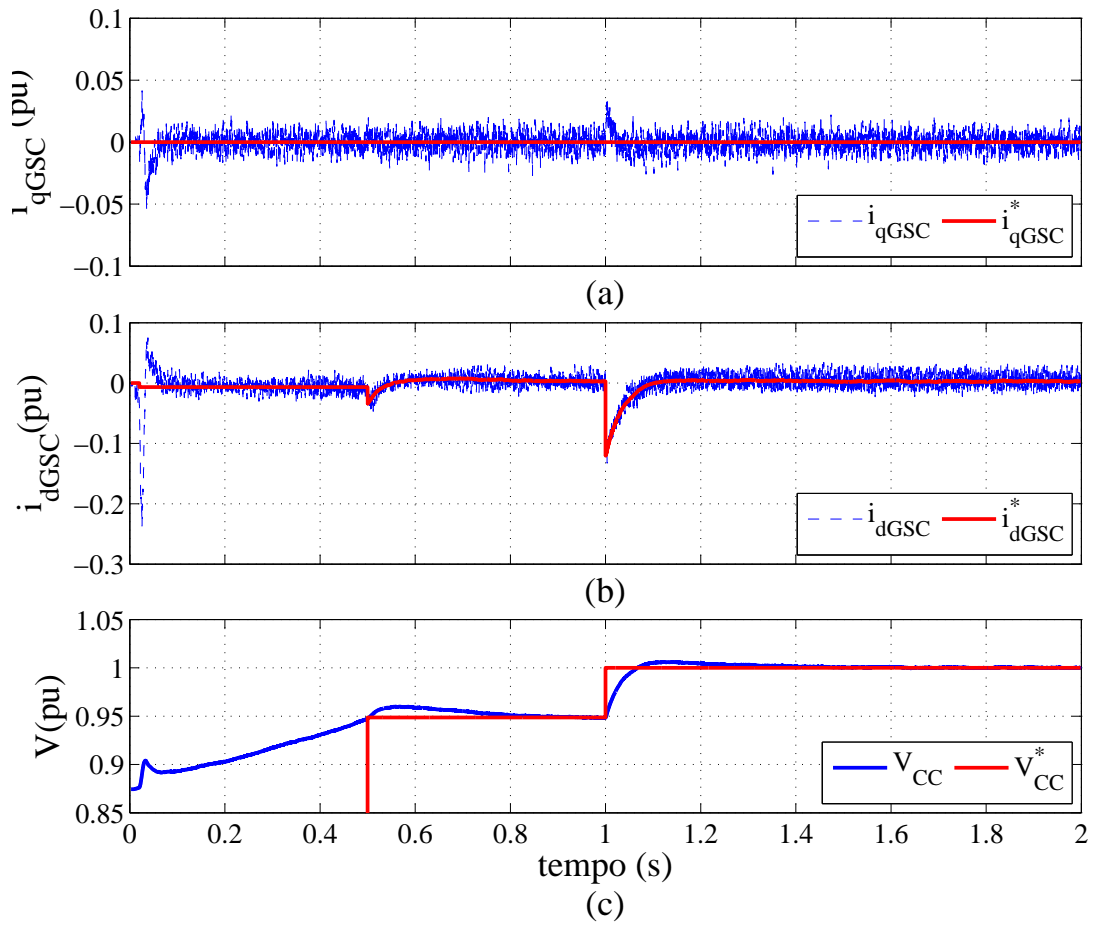


Figura 24: Simulação GSC.

Ainda observando a Figura 24 (a), a evolução da corrente i_{qGSC} com a sua referência mantida em zero, é possível perceber o acoplamento que há com o eixo direto principalmente nos instante de maior variação na referência da corrente do respectivo eixo. Na Figura 24 (b) a evolução da corrente i_{dGSC}^* responsável pelo controle da tensão no barramento, observa-se em conjunto com a Figura 24 (c), que após a pré carga do barramento, alcançando 0,88pu a tensão se eleva até 0,95pu apenas com a malha de corrente ativada. Em 500ms a malha de

tensão é ativada com a referência de 0,95pu. A partir de 1s a referência final é dada para que o barramento possa atingir o valor de operação nominal de 1pu ($350 V_{CC}$).

A estrutura de controle completa e as leituras dos sinais utilizados na implementação em DSP, são apresentados na Figura 25, destacam-se o controle do RSC e do GSC.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi apresentado a estrutura de controle utilizada no GIDA, o projeto das malhas internas de corrente que constitui o controle tanto do RSC quanto do GSC foi definido, além da malha de controle da potência estatórica e a malha responsável por regular a tensão no barramento CC. O controlador clássico PI foi utilizado nos projetos, uma vez que o controle é realizado em eixos síncronos.

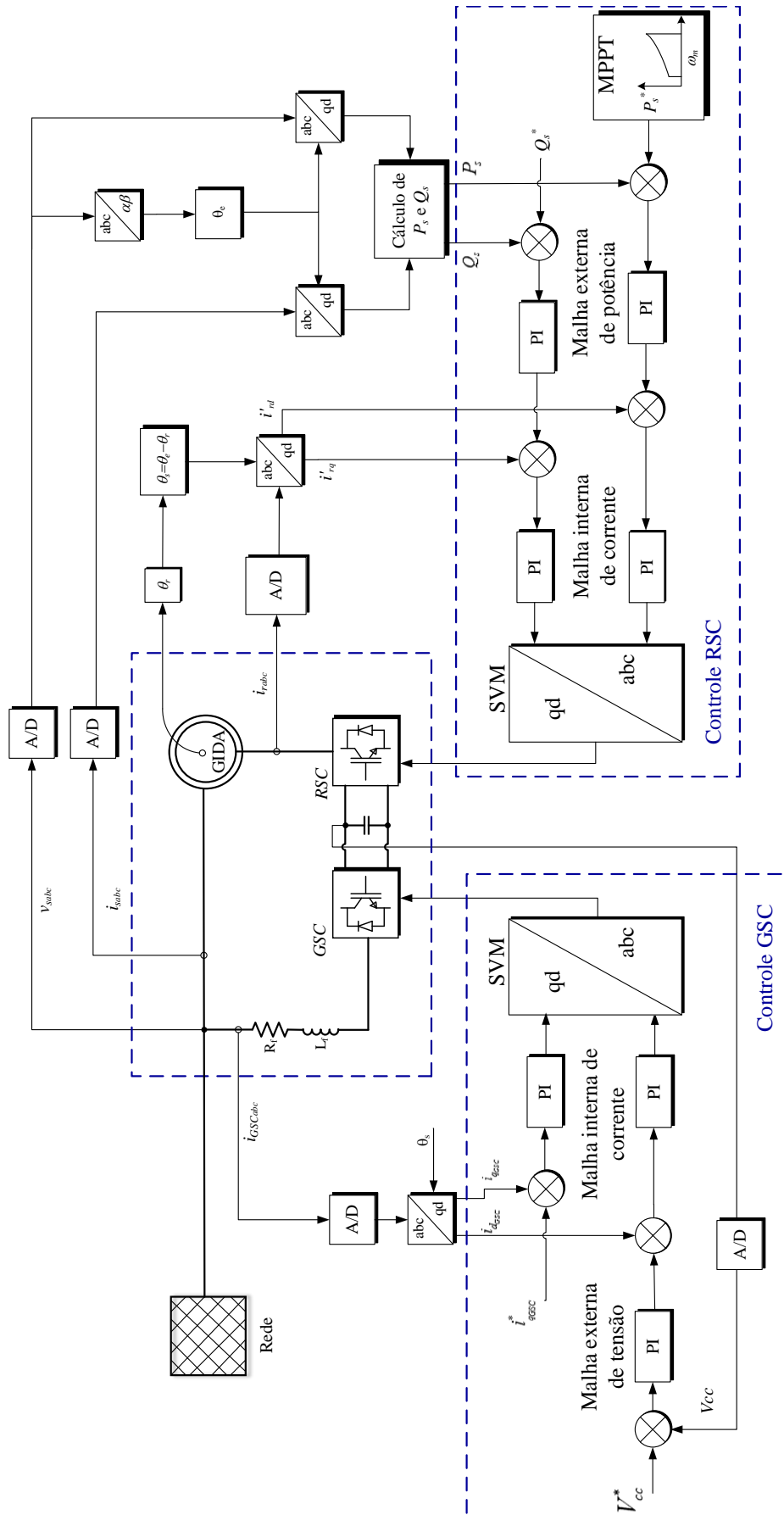


Figura 25: Diagrama de controle geral.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são abordados detalhes do funcionamento da plataforma experimental com o gerador, a rede emulada e o painel de controle. O conversor *back-to-back* utilizado na plataforma experimental, foi montado utilizando transistores IGBT modelo SKM50GB063D da *Semikron* que possui capacidade de corrente nominal de 50A, acima do valor necessário de 12A. Por estar sobre dimensionado é importante observar o impacto que isto proporciona na análise dos resultados experimentais, devido as perdas associadas. Nas próximas seções detalhes do funcionamento e os resultados obtidos experimentalmente serão abordados.

6.1 PROCEDIMENTO DE SINCRONISMO

Para o funcionamento do GIDA conectado, faz-se necessária a implementação de um *Phase Locked Loop* (PLL) para obter-se a referência de fase do sistema trifásico. A partir da leitura das tensões de linha da rede, uma transformação do sistema em coordenadas (a,b,c) é realizada para as coordenadas $\alpha\beta$ de modo que a partir destas componentes seja calculado θ_e conforme é exibido na Figura 26.

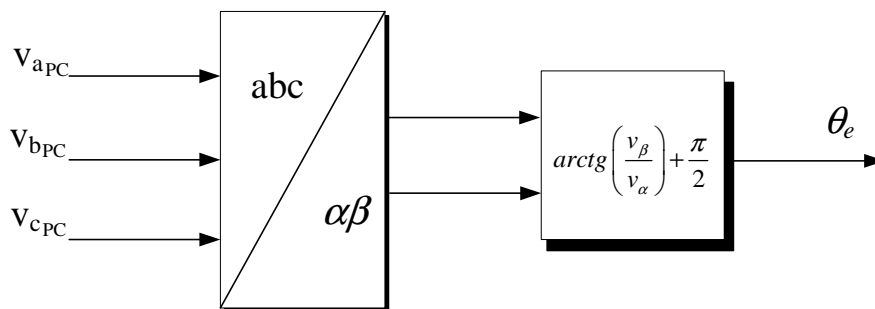


Figura 26: Diagrama para o PLL.

O acionamento correto e coordenado dos diversos componentes da plataforma experimental, garantem a conexão do sistema com a rede elétrica sem imprevistos. A Figura 27 mostra os contadores que são acionados ordenadamente, bem como os principais elementos que

compõem a plataforma experimental e os dois pontos de medição de corrente necessários para verificar a potência do estator e potência líquida injetada no PC.

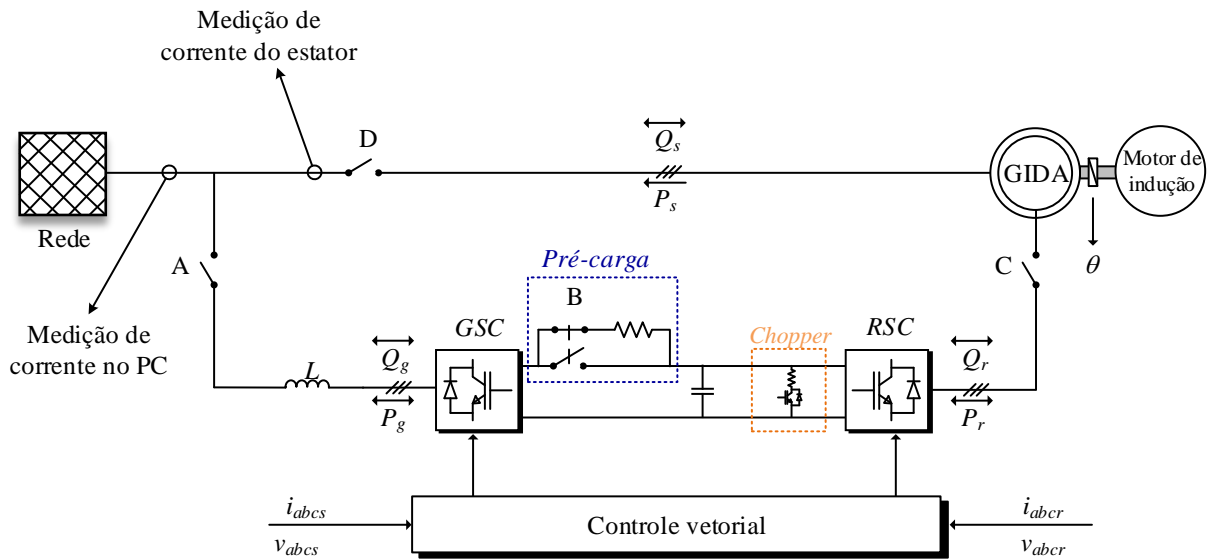


Figura 27: Diagrama simplificado do sistema.

A inicialização do sistema ocorre com o fechamento manual do contato “A”, fazendo com que o GSC atue como um retificador a diodos, sem SVM, carregando o barramento CC através do circuito de pré carga composto pelo resistor de pré carga e o contato fechado do contato “B”. Após este acionamento, a segunda etapa ocorre de forma automática, através de um relé temporizador que comuta o contato “B” desconectando o resistor de pré carga e conectando diretamente o barramento CC ao GSC iniciando o SVM para controle de tensão do barramento. A terceira etapa ocorre após o acionamento do contato C, observada a estabilização da tensão CC, para então efetuar a magnetização do GIDA fazendo o estator alcançar a tensão nominal e fase adequada para conexão à rede com o fechamento do contato “D”. Realizado estas etapas o sistema está pronto para fornecer potência ativa e realizar a troca de reativos com a rede no PC conforme a necessidade da referência.

Todas as conexões trifásicas são protegidas com disjuntores termomagnéticos para proteção de eventuais curto circuitos ou sobre carga. O circuito de *chopper* também atua como proteção e é ativado se a tensão do barramento alcance níveis inesperados caso o controle do GSC enfrente algum problema na regulação desta tensão. Será então descrito na próxima seção a operação do GSC e suas características.

6.2 OPERAÇÃO DO GSC

Quando é realizada uma análise teórica seguida da simulação em *software*, tem-se um ambiente ideal para comparação. No âmbito experimental, algumas diferenças ocorrem e devem ser corretamente interpretadas para compreensão do funcionamento geral do sistema.

A Figura 28 mostra a operação do conversor GSC desde o momento de sua conexão com a rede até regular a tensão do barramento CC em 350V. A operação é dividida em pré carga e malhas de controle ativadas:

- a. **Pré carga:** a tensão no barramento CC é elevada até 310V através do resistor de pré carga conectado em série que limita a corrente, ou seja, a operação do GSC é feita durante a etapa 1 como um retificador a diodos e na etapa 2 realiza-se o *by-pass* do resistor;
- b. **Malhas de controle ativadas:** as malhas de corrente do GSC são ativadas com valor fixo para $i_{dGSC}^* = -0,2A$ e para $i_{qGSC}^* = 0A$ na etapa 3, proporcionando uma elevação da tensão aproximando-a do valor de referência e durante a etapa 4 a malha de tensão é então habilitada e passa a manter a tensão do barramento em 350V para operação do gerador.

Este conversor opera sob FP unitário na análise deste trabalho, mas pode operar com $FP \neq 1$, indutivo ou capacitivo conforme será mostrado na seção 6.5.3.

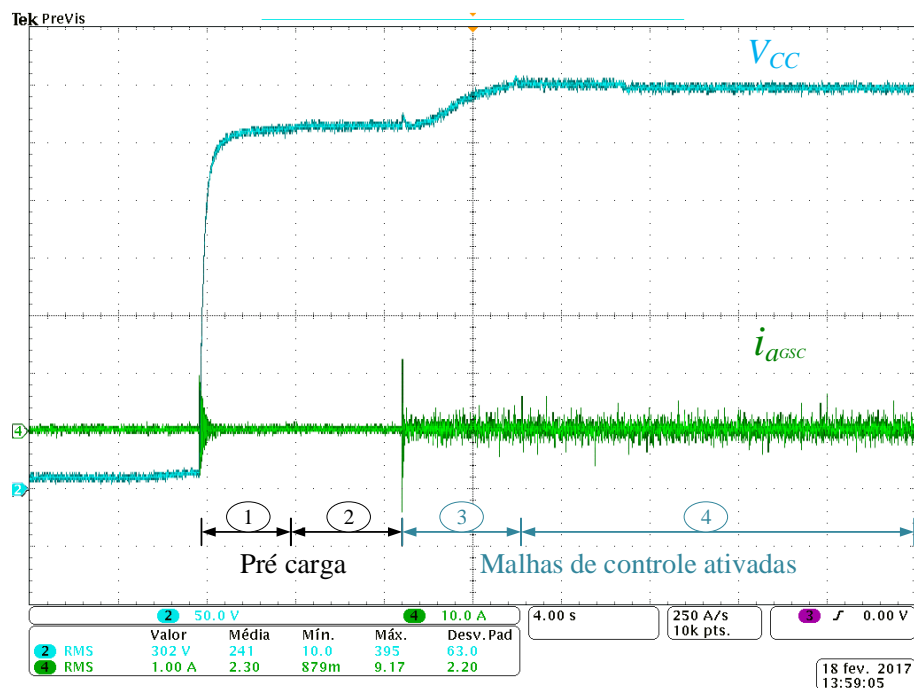


Figura 28: Inicialização do barramento CC.

É importante destacar que o GSC está controlando a tensão do barramento CC que é utilizado como fonte de energia para magnetização do GIDA que é realizada pelo RSC. A Figura 29 mostra a corrente de magnetização sendo aplicada ao rotor da máquina em duas etapas:

- a) GIDA desconectado do PC e
- b) GIDA conectado no PC.

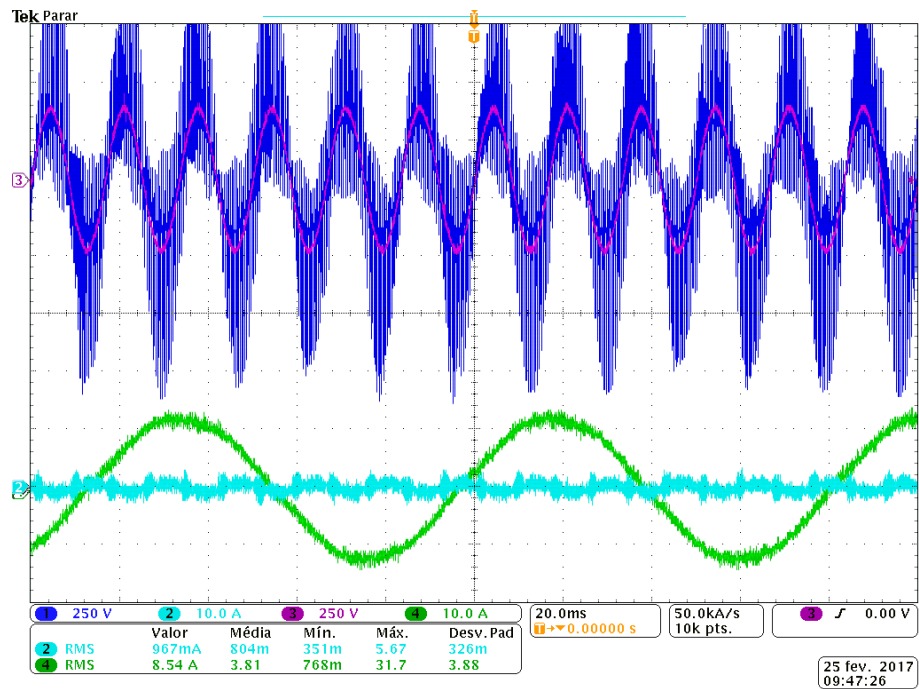
Na Figura 29 (a), o GIDA está operando em 1440 rpm ($0,8pu$) e a tensão induzida no estator para o sincronismo é visualizada em azul, e é nítida a distorção pelo fato do PWM empregado no rotor da máquina, a forma de onda rosa, é a tensão da rede no PC e identifica-se que elas estão em fase. Na Figura 29 (b), o GIDA está conectado a rede elétrica, e as tensões apresentam-se devidamente sincronizadas. Em ambos os casos, o RSC fornece a corrente de magnetização na fase A $i_{A_{RSC}}$ (canal 4) e no canal 2 a corrente na fase A do GSC $i_{A_{GSC}}$. A diferença nos valores *rms* apresentados está no fato que a corrente de magnetização é predominantemente reativa, enquanto que a corrente do GSC é a suficiente para compensar as perdas do sistema mantendo a tensão regulada.

De acordo com o exposto anteriormente, é necessária uma corrente praticamente constante para manter a tensão no barramento CC e investigando este ponto de operação, observa-se na Figura 30 (a), o consumo aproximado de 200 W para o GSC manter a tensão do barramento CC regulada durante o processo de magnetização do GIDA. Esta característica implica em particularidades que influenciarão na análise do funcionamento geral da máquina nos modos sub e sobre síncrono, devido ao fluxo de potência associado. E ainda, observando a Figura 30 (b), a medição de potência no estator mostra o GIDA conectado mas sem geração, muito menos consumindo reativos para magnetização da máquina, confirmado pela abordagem anterior sobre a Figura 29 onde a corrente de magnetização é toda suprida pelo RSC da máquina.

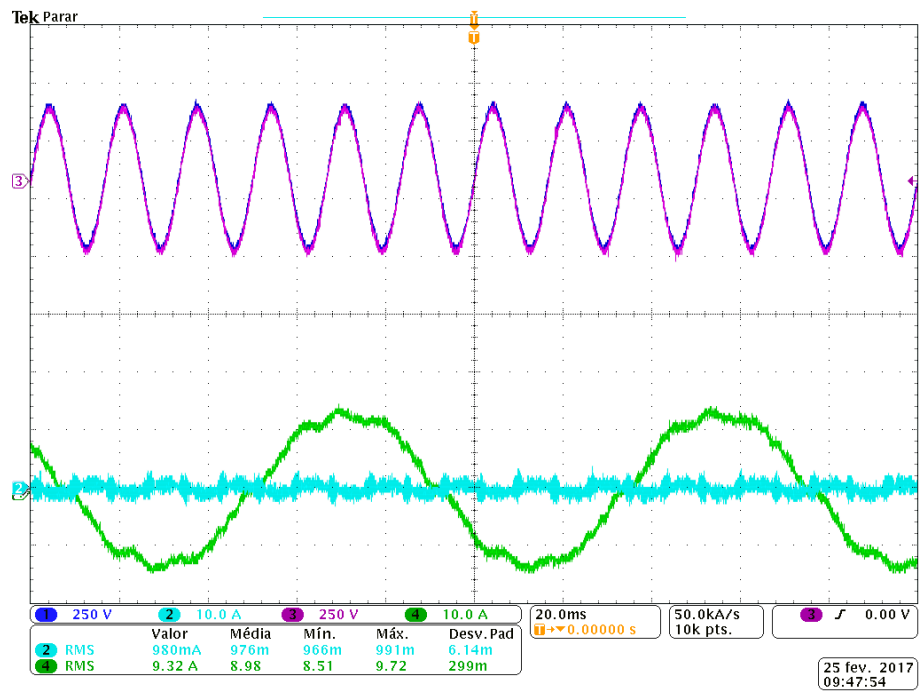
6.3 OPERAÇÃO DO RSC

As correntes que circulam no rotor de um GIDA, possuem frequência proporcional ao escorregamento, desta forma para sua faixa de operação desde o modo sub síncrono até o sobre síncrono, a frequência elétrica compensa a diferença de velocidade entre o rotor e o estator de forma a manter a frequência elétrica no estator constante. A Figura 31 mostra as correntes rotóricas desde o modo sub até o sobre síncrono.

Importante destacar a inversão de fase que ocorre no modo sobre síncrono, isto ocorre pois é o momento que o rotor passa a fornecer energia ao sistema, isto implica em uma tendência



(a) Antes da conexão.



(b) Conectado.

Figura 29: Corrente de magnetização através do RSC e corrente no GSC para o barramento carregado a $350 V_{cc}$.

a elevar a tensão do barramento CC, fazendo com o que o GSC a fim manter a tensão ajustada, envie esta energia excedente para a rede no PC.

Além disso, as correntes rotóricas controlam a potência do estator, portanto conforme já fora discutido no Capítulo 5, a mudança de amplitude e fase destas correntes provocam o

Potência e Energia				
FUND	0	0:35:06		
A	B	C	Total	
kW			0.20	
kVA			0.22	
kVAR			÷ 0.02	
PF			0.50	
DPF			0.91	
Arms	1.1	1.0	0.8	
AB	BC	CA		
Vrms	219.5	217.2	217.9	
25/02/17 08:07:57 208V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE			ENERGY	TREND
^ ^			HOLD	RUN

(a) Medição no PC.

Potência e Energia				
FUND	0	0:34:28		
A	B	C	Total	
kW			- 0.02	
kVA			0.14	
kVAR			0.00	
PF			-0.08	
DPF			-0.17	
Arms	0.5	0.6	0.6	
AB	BC	CA		
Vrms	219.6	216.7	217.4	
25/02/17 08:07:20 208V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE			ENERGY	TREND
^ ^			HOLD	RUN

(b) Medição no estator.

Figura 30: Consumo durante operação barramento CC.

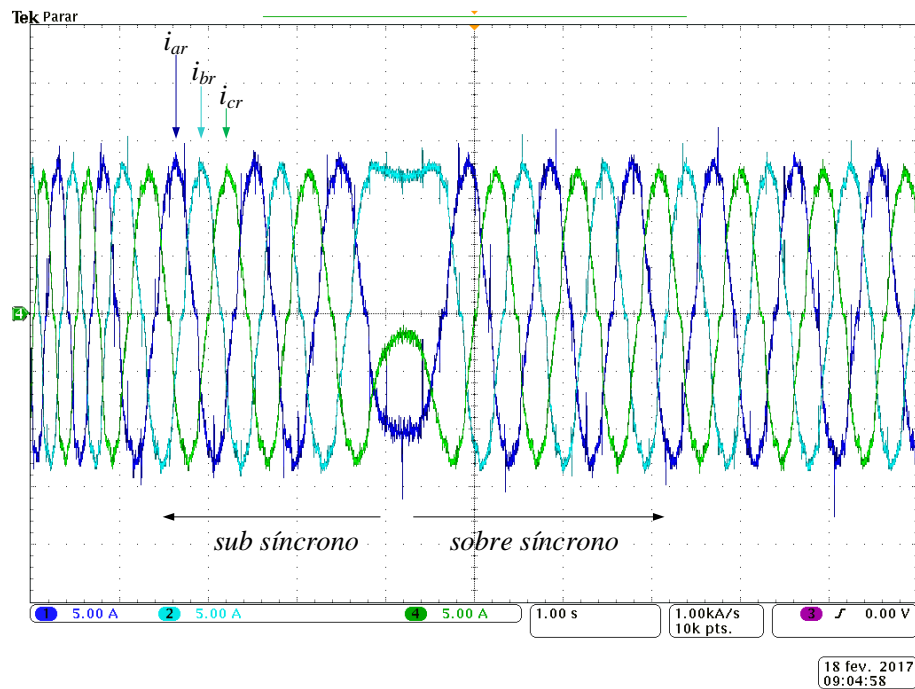


Figura 31: Correntes rotóricas durante transição de velocidade do sub para a sobre síncrona.

ajuste necessário na potência, tanto ativa quanto reativa, para o ponto de operação desejado.

6.4 RESULTADOS INICIAIS COM REDE IDEAL

A análise da plataforma experimental em rede ideal, proporciona uma importante etapa de validação de todas as malhas de controle utilizadas, os indicadores do correto funcionamento estarão sendo observados nas referências de potência interpostas à máquina em cada velocidade de vento disponível. Como a análise se dá em regime permanente e com o objetivo principal de verificar a variação de tensão no PC, para cada velocidade em que a máquina primária for

ajustada, uma referência de potência ativa será fornecida à máquina, respeitando o FP desejável. Na Tabela 6 é apresentado os pontos de operação analisados e a referência de potência ativa.

Tabela 6: Tabela de MPPT para os pontos de operação analisados.

Velocidade do gerador (pu)	P_s^* (W)
0,7	-660
0,8	-810
0,9	-1020
1	-1290
1,1	-1590
1,2	-1950
1,3	-2289

O equipamento utilizado para análise e captura de telas com as potências medidas, foi o FLUKE[®] 434 *Power Quality Analyzer*. A conexão do equipamento teve suas ponteiros de medição fixadas no PC e os sensores de correntes foram inseridos em dois pontos distintos (duas etapas de medição), no ramo do estator e no ramo de saída do PC conforme foi exibido na Figura 27, isto é necessário para poder quantificar a quantidade de energia inserida pelo estator da máquina e a potência líquida injetada no PC para a rede. A Figura 32 exemplifica as medições obtidas para conexão do GIDA a 1440 rpm, ou seja, 0,8 pu de velocidade. Outra característica importante sobre as medições é o fato deste medidor apresentar dois cálculos de fator de potência, sendo que o interesse deste trabalho está de acordo com o parâmetro DPF em conformidade com a definição de fator de potência do PRODIST apresentado na seção 3.2.

Através da Figura 32 (a) observa-se a medição do GIDA após a conexão (fechamento do contator D) e a potência ativa praticamente nula, ao ser ativada a geração de potência de acordo com a Tabela 6, o despacho ocorre com dois valores diferentes, no PC Figura 32(b), a potência entregue é menor do que a referência dada para o estator, Figura 32(c). Como a referência é dada para o estator e a potência no rotor é proporcional ao escorregamento da máquina conforme a equação (13), têm-se no PC uma potência menor do que está sendo gerada, pois a velocidade é sub síncrona.

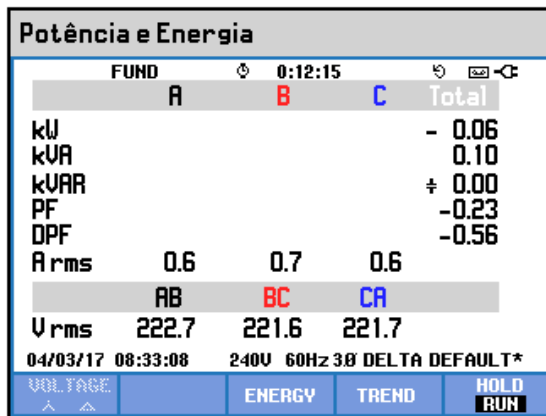
Neste ponto de operação a partir da equação 13 têm-se:

$$P_r = -0,2 \times (-810) = 162W$$

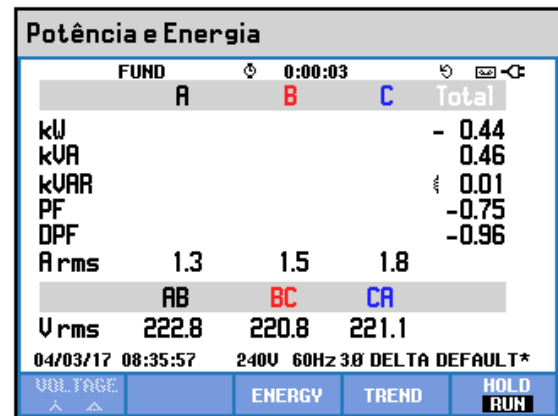
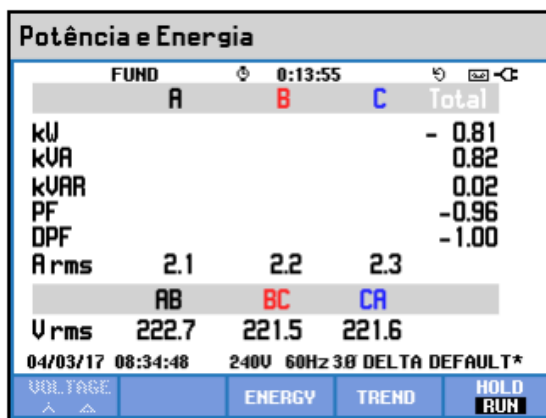
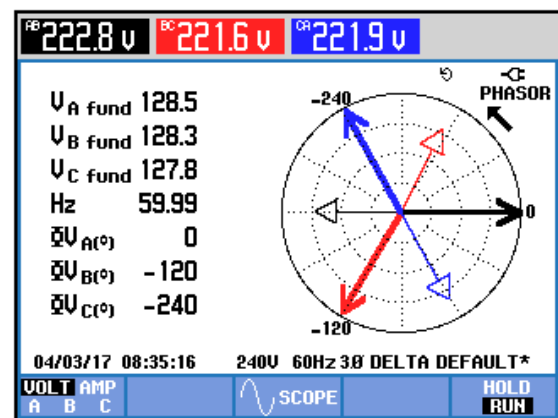
$$P_t = P_r + P_s$$

$$P_t = 162 + (-810) = -648W$$

lembrando ainda conforme explicado na seção 6.2, o sistema possui uma perda aproximada de 200W, implica que a potência total (P_T) gerada, será dada pela equação (139):



(a) Conexão do GIDA a 1440 rpm.

(b) Medição no PC, $P_s^* = -810W$.(c) Medição no estator, $P_s^* = -810W$.

(d) Diagrama fasorial do estator.

Figura 32: Conexão a 1440 rpm com FP unitário.

$$P_T = P_r + P_s + P_{PERDAS} \quad (139)$$

desta forma chega-se a:

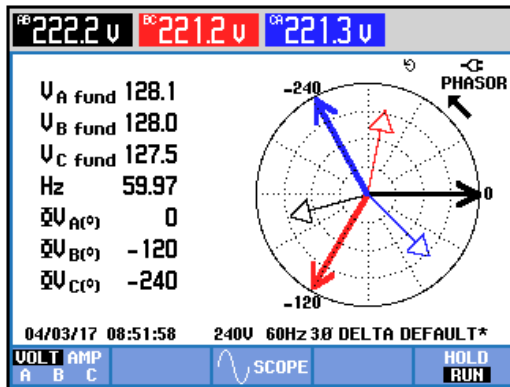
$$P_T = 162 + (-810) + 200$$

$$P_T = -448W$$

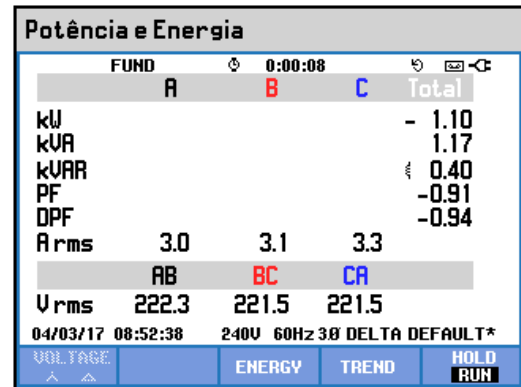
Confirmando o valor obtido na medição de potência no PC na Figura 32(b) de -440W. Outro ponto de observação é o diagrama fasorial exibido na Figura 32(d), com ele é possível confirmar a operação do GIDA com fator de potência unitário.

Na Figura 33(a), o ponto de operação de velocidade síncrona é apresentado. O fator de potência definido é 0,95 indutivo. No diagrama fasorial apresentado, nota-se o ângulo formado pela corrente e tensão do estator para a operação com FP indutivo. Neste ponto de operação, o escorregamento é nulo e a potência rotórica também, portanto a potência entregue à rede,

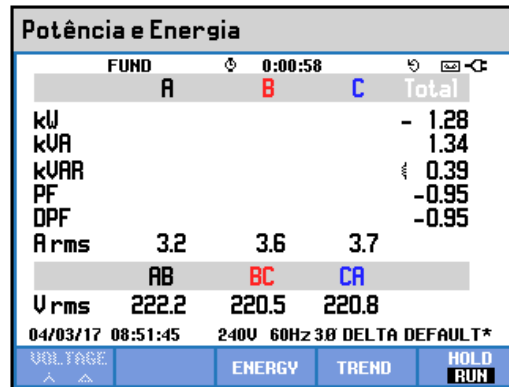
Figura33(b), deveria ser igual a potência do estator Figura33(c), o que não ocorre pelas perdas associadas ao sistema e definida na seção 6.2, nota-se uma diferença de 180W, um pouco menor pois parte da magnetização é realizada pelo estator.



(a) Diagrama fasorial estator.



(b) Medição no PC, $P_s^* = -1280W$.

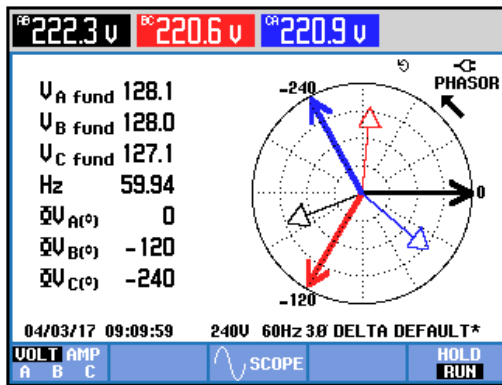


(c) Medição no estator, $P_s^* = -1280W$.

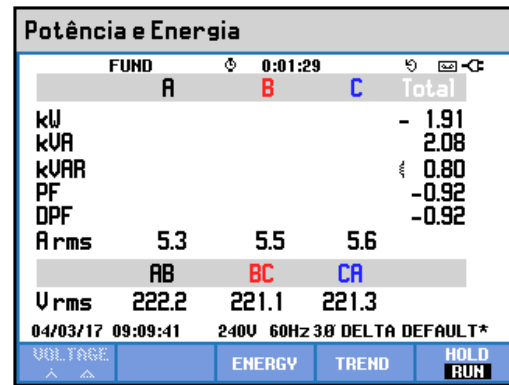
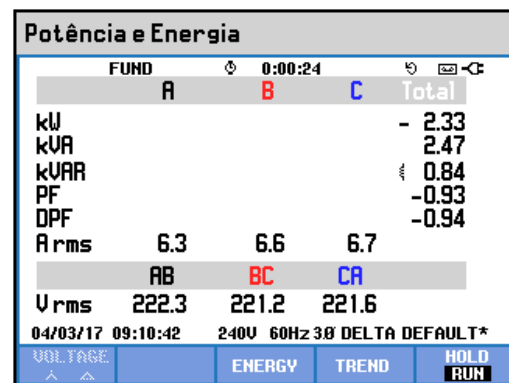
Figura 33: Medições a 1800 rpm com FP=0,95 indutivo.

Com a Figura 34, observa-se a operação do GIDA com $FP = 0,92$ indutivo em velocidade sobre síncrona, em (c) a potência entregue à rede através do PC, é maior do que a referência de potência fornecida pelo estator (b). Observando na Figura 34(d), a referência de potência ativa foi mantida e apenas a velocidade do GIDA foi elevada, fazendo com que a potência entregue ao PC também aumente, respeitando a relação dada pela equação (13).

A utilização de diferentes fatores de potência exibidos nas Figuras (32-34), foi realizada para demonstrar a liberdade de controle disponível para o GIDA, ao passo que alguns conceitos teóricos e experimentais são discutidos e devidamente abordados para compreensão das diferenças entre eles. Por fim, um quesito não abordado com estes resultados experimentais é sobre a elevação de tensão no PC, o cenário para a rede rural e a análise dos resultados sobre a elevação de tensão, é então abordado na próxima seção.



(a) Diagrama fasorial estator.

(b) Medição no estator 2160 rpm, $P_s^* = -1910W$.(c) Medição no PC a 2160 rpm, $P_s^* = -1910W$.(d) Medição no PC a 2340 rpm, $P_s^* = -1910W$.**Figura 34: Medições com FP=0,92 indutivo.**

6.5 VARIAÇÃO DE TENSÃO EM REDE RURAL

A rede emulada neste trabalho, apresenta as características de uma rede rural em baixa tensão com 3 km de extensão caracterizada por uma impedância de linha $Z_l = (0,467 + j0,113)\Omega/km$, equivalente a um cabo multiplexado de $70mm^2$, obtida através de um reostato trifásico e três indutores monofásicos. Desta maneira foi possível experimentar os efeitos da inserção de potência ativa no nível de tensão no PC e também avaliar a contribuição do controle de reativos na regulação de tensão. Todos os cenários avaliam a geração de potência pelo GIDA e sem consumo no PC, caracterizando desta maneira, um cenário crítico para a variação de tensão.

6.5.1 GIDA com FP unitário

A operação de um gerador com fator de potência unitário possui a vantagem de estar apenas gerando potência ativa para a rede. Do ponto de vista da máquina, operá-la com fator de potência unitário implica em magnetizá-la totalmente pelo rotor, fazendo com que correntes

maiores e próximas ao limite de operação circulem no circuito rotórico desta máquina. A Figura 35 mostra a medição no estator da máquina quando é realizada a sua conexão com a rede rural e não há troca de reativos nem a potência ativa associada é praticamente nula.

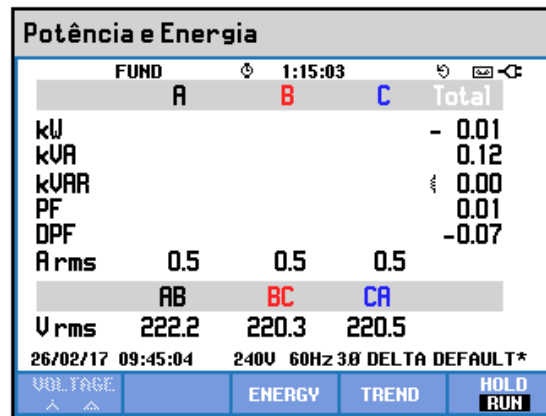
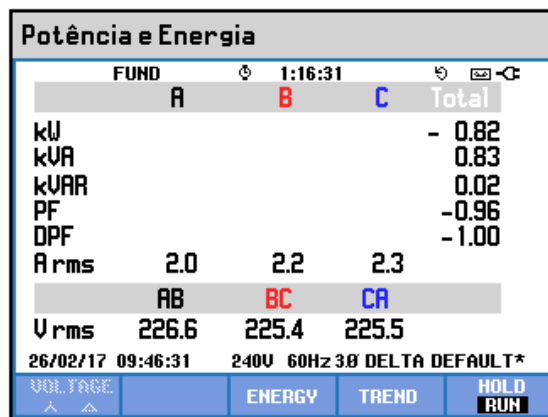
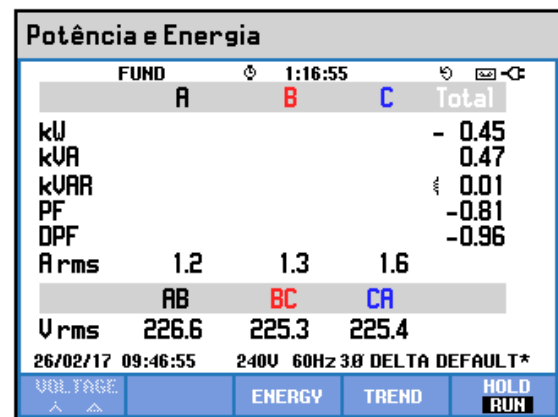


Figura 35: Conexão a 1440 rpm com FP unitário em rede rural.

A Figura 36 mostra as medições realizadas no estator e PCconexão com o GIDA conectado no PC. É evidente na Figura 36(a) em relação a Figura 35, a elevação de tensão ocorrida em torno de 2,17%, isso para uma potência líquida no PC de apenas 450 W (Figura 35(b)).



(a) Medição no estator, $P_s^* = -820W$.



(b) Medição no PC, $P_s^* = -820W$.

Figura 36: Conexão e geração a 1440 rpm com FP unitário em rede rural.

A Figura 37 mostra o resultado obtido a partir da velocidade síncrona. Observa-se o FP unitário tanto no estator quanto no PC e a elevação de tensão é novamente evidenciada.

A Figura 38 mostra o resultado obtido a partir da velocidade sobre síncrona, este ponto de maior potência faz com que a elevação de tensão ultrapasse o limite estabelecido (ANEEL, 2017a). Em (b) observa-se a potência entregue ao PC maior do que aquela de referência para o estator.

Potência e Energia				
FUND	1:18:54			
	A	B	C	Total
kW				- 1.29
kVA				1.29
kVAR				0.03
PF				-0.98
DPF				-1.00
Arms	3.0	3.3	3.6	
	AB	BC	CA	
Vrms	230.5	228.7	228.7	
26/02/17 09:48:55 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(a) Medição no estator.

Potência e Energia				
FUND	1:19:12			
	A	B	C	Total
kW				- 1.09
kVA				1.09
kVAR				0.03
PF				-0.95
DPF				-1.00
Arms	2.6	2.8	3.2	
	AB	BC	CA	
Vrms	230.5	228.8	228.7	
26/02/17 09:49:13 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(b) Medição no PC.

Figura 37: Medições com FP unitário na velocidade síncrona $P_s^* = -1290W$.

Mantendo a referência de potência no estator em -1920 W e elevando a velocidade do gerador para a máxima com escorregamento de 30%, a potência líquida no PC aumenta (Figura 38)(c) e consequentemente a tensão no PC também, atingindo o valor máximo experimentado. A referência foi mantida para não ultrapassar o limite da máquina primária preservando seu funcionamento.

Potência e Energia				
FUND	1:20:55			
	A	B	C	Total
kW				- 1.92
kVA				1.92
kVAR				0.04
PF				-0.98
DPF				-1.00
Arms	4.6	4.8	5.0	
	AB	BC	CA	
Vrms	236.8	235.7	235.3	
26/02/17 09:50:55 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(a) Medição no estator a 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND	1:21:13			
	A	B	C	Total
kW				- 2.09
kVA				2.08
kVAR				0.05
PF				-0.98
DPF				-1.00
Arms	5.0	5.1	5.5	
	AB	BC	CA	
Vrms	236.9	235.9	235.5	
26/02/17 09:51:13 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(b) Medição no PC a 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND	1:21:28			
	A	B	C	Total
kW				- 2.28
kVA				2.27
kVAR				0.05
PF				-0.99
DPF				-1.00
Arms	5.4	5.5	5.9	
	AB	BC	CA	
Vrms	238.2	237.2	236.6	
26/02/17 09:51:28 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(c) Medição no PC a 2340 rpm.

Figura 38: Medições com FP unitário na velocidade sobre síncrona $P_s^* = -1920W$.

A utilização de FP unitário é boa pelo fato da Resolução 482 (ANEEL, 2012, 2015) realizar a bonificação para o produtor em forma de compensação, e considerando que a cobrança é realizada pela potência ativa, a energia é melhor aproveitada. Porém deve-se analisar o fato da elevação de tensão no PC que ultrapassou os limites estabelecidos, pode ter um desempenho melhorado se for utilizado a capacidade da máquina em fornecer reativos, estes resultados são apresentados na sequência.

6.5.2 GIDA com FP indutivo

A primeira situação onde a troca de reativos com a rede é experimentada, o FP de 0,96 indutivo foi definido para o funcionamento do estator e os resultados para alguns pontos de operação são exibidos na Figura 39, outros resultados para os FP de 0,92; 0,87 e 0,58 indutivos, são apresentados nas Figuras 40, 41 e 42, respectivamente.

Potência e Energia				
FUND 1:26:46				
	A	B	C	Total
kW				- 0.82
kVA				0.86
kVAR				0.25
PF				-0.92
DPF				-0.95
Arms	2.0	2.3	2.4	
	AB	BC	CA	
Urms	227.3	225.7	225.8	
26/02/17 09:56:46 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(a) Estator, 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND 1:27:18				
	A	B	C	Total
kW				- 0.45
kVA				0.52
kVAR				0.25
PF				-0.75
DPF				-0.86
Arms	1.3	1.5	1.7	
	AB	BC	CA	
Urms	227.9	226.7	226.8	
26/02/17 09:57:19 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(b) PC, 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND 1:28:58				
	A	B	C	Total
kW				- 1.27
kVA				1.34
kVAR				0.40
PF				-0.94
DPF				-0.95
Arms	3.2	3.4	3.6	
	AB	BC	CA	
Urms	231.6	230.5	230.5	
26/02/17 09:58:58 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(c) Estator, 1800 rpm.

Potência e Energia				
FUND 1:29:24				
	A	B	C	Total
kW				- 1.11
kVA				1.18
kVAR				0.40
PF				-0.92
DPF				-0.94
Arms	2.8	3.0	3.2	
	AB	BC	CA	
Urms	231.6	230.6	230.7	
26/02/17 09:59:24 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(d) PC, 1800 rpm.

Potência e Energia				
FUND 1:30:57				
	A	B	C	Total
kW				- 1.92
kVA				2.01
kVAR				0.60
PF				-0.94
DPF				-0.96
Arms	4.7	5.0	5.2	
	AB	BC	CA	
Urms	237.3	236.1	235.9	
26/02/17 10:00:57 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(e) Estator, 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND 1:31:19				
	A	B	C	Total
kW				- 2.12
kVA				2.19
kVAR				0.60
PF				-0.95
DPF				-0.97
Arms	5.3	5.4	5.6	
	AB	BC	CA	
Urms	237.5	236.6	236.3	
26/02/17 10:01:19 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(f) PC, 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND 1:26:09				
	A	B	C	Total
kW				0.01
kVA				0.09
kVAR				0.00
PF				0.01
DPF				0.08
Arms	0.5	0.5	0.5	
	AB	BC	CA	
Urms	223.3	221.9	221.9	
26/02/17 09:56:10 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(g) Conexão $P_s^* = 0W$ a 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND 1:31:33				
	A	B	C	Total
kW				- 2.33
kVA				2.40
kVAR				0.61
PF				-0.96
DPF				-0.97
Arms	5.7	5.9	6.1	
	AB	BC	CA	
Urms	238.6	237.7	237.3	
26/02/17 10:01:34 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(h) PC, 2340 rpm e $P_s^* = -1920W$.

Figura 39: Medições com FP=0,96 indutivo.

Potência e Energia				
FUND		1:35:03		
A		B	C	Total
kW				- 0.80
kVA				0.88
kVAR				0.34
PF				-0.90
DPF				-0.92
Arms		2.1	2.4	2.4
AB		BC	CA	
Urms		227.3	225.8	226.2
26/02/17 10:05:03 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(a) Estator, 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND		1:35:26		
A		B	C	Total
kW				- 0.46
kVA				0.58
kVAR				0.33
PF				-0.71
DPF				-0.80
Arms		1.4	1.7	1.8
AB		BC	CA	
Urms		227.4	225.9	226.2
26/02/17 10:05:26 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(b) PC, 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND		1:36:56		
A		B	C	Total
kW				- 1.28
kVA				1.39
kVAR				0.54
PF				-0.91
DPF				-0.92
Arms		3.3	3.5	3.7
AB		BC	CA	
Urms		231.4	229.9	229.7
26/02/17 10:06:56 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(c) Estator, 1800 rpm.

Potência e Energia				
FUND		1:37:22		
A		B	C	Total
kW				- 1.10
kVA				1.23
kVAR				0.55
PF				-0.87
DPF				-0.90
Arms		2.9	3.1	3.4
AB		BC	CA	
Urms		231.3	230.4	230.2
26/02/17 10:07:22 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(d) PC, 1800 rpm.

Potência e Energia				
FUND		1:39:11		
A		B	C	Total
kW				- 1.90
kVA				2.07
kVAR				0.81
PF				-0.91
DPF				-0.92
Arms		4.9	5.2	5.3
AB		BC	CA	
Urms		237.1	235.8	235.4
26/02/17 10:09:11 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(e) Estator, 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND		1:39:30		
A		B	C	Total
kW				- 2.14
kVA				2.29
kVAR				0.83
PF				-0.92
DPF				-0.93
Arms		5.4	5.6	5.9
AB		BC	CA	
Urms		237.2	236.2	235.8
26/02/17 10:09:30 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(f) PC, 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND		1:34:23		
A		B	C	Total
kW				0.01
kVA				0.10
kVAR				0.00
PF				0.01
DPF				0.06
Arms		0.5	0.5	0.5
AB		BC	CA	
Urms		223.2	221.6	221.8
26/02/17 10:04:23 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(g) Conexão $P_s^* = 0W$ a 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND		1:39:42		
A		B	C	Total
kW				- 2.32
kVA				2.45
kVAR				0.83
PF				-0.93
DPF				-0.94
Arms		5.8	6.0	6.3
AB		BC	CA	
Urms		238.2	237.3	237.0
26/02/17 10:09:43 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(h) PC, 2340 rpm e $P_s^* = -1920W$.

Figura 40: Medições com FP=0,92 indutivo.

Potência e Energia				
FUND		0:04:28		
A		B	C	Total
kW				- 0.81
kVA				0.94
kVAR				0.46
PF				-0.85
DPF				-0.87
Arms	2.2	2.6	2.6	
AB		BC	CA	
Urms	227.0	225.4	225.9	
26/02/17 11:29:39 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD RUN	

(a) Estator, 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND		0:04:50		
A		B	C	Total
kW				- 0.48
kVA				0.67
kVAR				0.46
PF				-0.65
DPF				-0.71
Arms	1.5	2.0	2.0	
AB		BC	CA	
Urms	227.0	224.9	225.3	
26/02/17 11:30:01 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

(b) PC, 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND		0:07:23		
	A	B	C	Total
kW				- 1.28
kVA				1.47
kVAR				0.73
PF				-0.86
DPF				-0.87
Arms	3.5	3.8	3.9	
	AB	BC	CA	
Urms	230.8	229.4	229.7	
26/02/17 11:32:34 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

(c) Estator, 1800 rpm.

Potência e Energia				
FUND		0:07:44		
A		B	C	Total
kW				- 1.13
kVA				1.35
kVAR				0.74
PF				-0.82
DPF				-0.84
Arms	3.2	3.6	3.6	
AB		BC	CA	
Urms	230.9	229.1	229.4	
26/02/17 11:32:55 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

(d) PC, 1800 rpm.

Potência e Energia				
FUND		0:09:36		
	A	B	C	Total
kW				- 1.91
kVA				2.20
kVAR				1.10
PF				-0.86
DPF				-0.87
Arms	5.3	5.4	5.6	
	AB	BC	CA	
Urms	236.2	235.9	235.5	
26/02/17 11:34:47 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN



(e) Estator, 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND		0:09:56		
	A	B	C	Total
kW				- 2.15
kVA				2.42
kVAR				1.12
PF				-0.88
DPF				-0.89
Arms	5.8	5.9	6.2	
	AB	BC	CA	
Urms	236.4	236.0	235.6	
26/02/17 11:35:07 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

(f) PC, 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND		0:03:05		
A		B	C	Total
kW				0.01
kVA				0.12
kVAR				0.00
PF				0.02
DPF				0.06
Arms	0.5	0.5	0.5	
AB		BC	CA	
Urms	223.1	221.5	221.7	
26/02/17 11:28:16 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

(g) Conexão $P_s^* = 0W$ a 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND		0:10:11		 
A		B	C	Total
kW				- 2.34
kVA				2.58
kVAR				1.12
PF				-0.89
DPF				-0.91
Arms	6.2	6.3	6.6	
AB		BC	CA	
Urms	237.5	237.2	236.8	
26/02/17 11:35:22 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

(h) PC, 2340 rpm e $P_s^* = -1920W$.

Figura 41: Medições com FP=0,87 indutivo.

Potência e Energia				
FUND 0:05:09				
A B C Total				
kW				- 0.79
kVA				1.36
kVAR				1.10
PF				-0.57
DPF				-0.58
Arms	3.4	3.7	3.6	
AB BC CA				
Urms	224.1	222.9	223.4	
26/02/17 16:16:04 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(a) Estator, 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND 0:05:41				
A B C Total				
kW				- 0.50
kVA				1.22
kVAR				1.11
PF				-0.40
DPF				-0.41
Arms	3.1	3.3	3.3	
AB BC CA				
Urms	224.3	223.3	223.7	
26/02/17 16:16:35 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(b) PC, 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND 0:07:55				
A B C Total				
kW				- 1.25
kVA				2.14
kVAR				1.75
PF				-0.58
DPF				-0.58
Arms	5.3	5.6	5.6	
AB BC CA				
Urms	227.8	226.9	226.9	
26/02/17 16:18:49 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(c) Estator, 1800 rpm.

Potência e Energia				
FUND 0:08:17				
A B C Total				
kW				- 1.15
kVA				2.09
kVAR				1.76
PF				-0.54
DPF				-0.55
Arms	5.2	5.5	5.5	
AB BC CA				
Urms	227.6	226.2	226.3	
26/02/17 16:19:12 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(d) PC, 1800 rpm.

Potência e Energia				
FUND 0:10:09				
A B C Total				
kW				- 1.87
kVA				3.21
kVAR				2.61
PF				-0.58
DPF				-0.58
Arms	7.9	8.2	8.2	
AB BC CA				
Urms	231.9	231.2	230.9	
26/02/17 16:21:03 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(e) Estator, 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND 0:10:31				
A B C Total				
kW				- 2.18
kVA				3.41
kVAR				2.65
PF				-0.63
DPF				-0.64
Arms	8.4	8.6	8.8	
AB BC CA				
Urms	232.1	231.3	231.1	
26/02/17 16:21:25 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(f) PC, 2160 rpm.

Potência e Energia				
FUND 0:03:35				
A B C Total				
kW				- 0.00
kVA				0.11
kVAR				0.01
PF				0.01
DPF				-0.04
Arms	0.5	0.5	0.5	
AB BC CA				
Urms	221.7	220.0	220.7	
26/02/17 16:14:30 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(g) Conexão $P_s^* = 0W$ a 1440 rpm.

Potência e Energia				
FUND 0:10:59				
A B C Total				
kW				- 2.37
kVA				3.54
kVAR				2.65
PF				-0.66
DPF				-0.67
Arms	8.6	8.9	9.1	
AB BC CA				
Urms	233.6	233.0	232.5	
26/02/17 16:21:53 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY	TREND	HOLD	RUN

(h) PC, 2340 rpm e $P_s^* = -1920W$.

Figura 42: Medições com FP=0,58 indutivo.

É importante observar o fato de que a tensão inicial não ser a mesma do caso apresentado para FP unitário, pois é uma característica inerente da rede da concessionária, isso impossibilita a comparação direta dos valores de tensão obtidos. Para facilitar a comparação da elevação de tensão, serão compilados os valores de tensão de forma gráfica e apresentadas as elevações percentuais em cada ponto de operação para todos os fatores de potência.

A operação do GIDA em uma rede rural, apresenta particularidades que devem ser levados em conta ao considerarmos a geração distribuída. De fato a característica da rede rural em si e a sua variação de tensão sendo proporcional à parcela de potência ativa, pode ser verificada com qualquer tipo de geração.

Com a inserção de potência ativa na rede, verifica-se a elevação de tensão proporcional à quantidade injetada e relacionada também com a impedância de linha. Este cenário pôde ser verificado experimentalmente. Os resultados obtidos para a operação do GIDA com diferentes fatores de potência, foram compilados utilizando o valor médio das medidas das tensões de linha em cada ponto de operação, e a variação da tensão em função da velocidade do gerador, é apresentada na Figura 43.

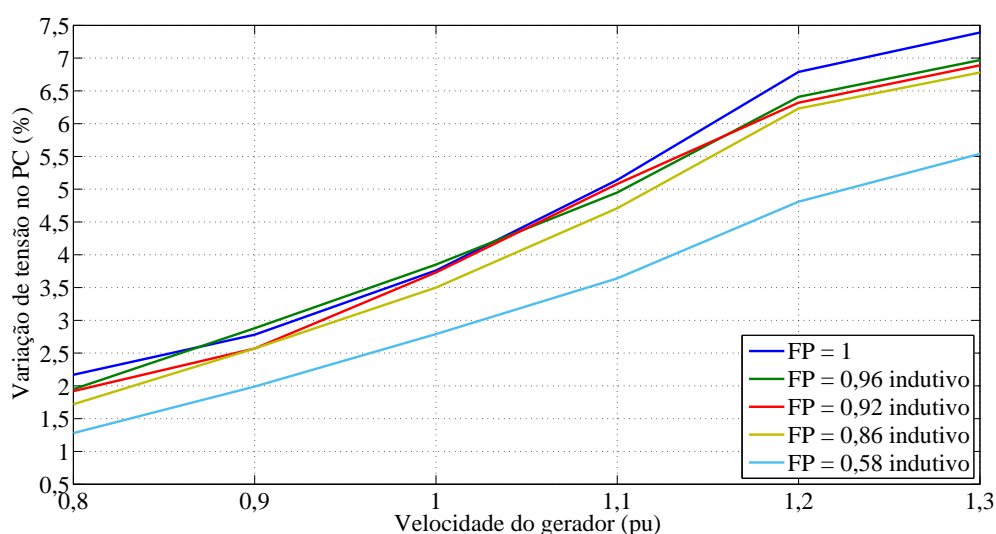


Figura 43: Variação de tensão no PC.

O resultado para cinco fatores de potência são exibidos na Figura 43 em forma de variação de tensão no PC, em todos os casos ocorreu aumento de potência ativa de acordo com a velocidade do gerador. A tensão se eleva no PC em todos os casos, porém com FP indutivo há uma redução deste incremento, evidenciando a real possibilidade de contribuir na regulação de tensão.

6.5.3 GSC fornecendo reativos

O GSC é um conversor paralelo conectado ao PC, seu principal objetivo é garantir a tensão do barramento CC estável para o funcionamento e controle adequado do RSC. A operação típica e adotada neste trabalho, faz com que o FP seja unitário, porém ele pode dar sua parcela de contribuição na regulação de tensão.

Já foi apresentado na seção anterior que o funcionamento do GIDA tem facilidade em operar com FP indutivo, mas no caso em que não há vento e há consumo de energia no PC, configura-se um cenário crítico capaz de alterar o nível de tensão reduzindo-o. Desta forma, pretende-se demonstrar a possibilidade de operar o GSC também para contribuir com o controle de tensão, pois a estrutura de controle e potência está pronta também para isto.

Na Figura 44 o PC é monitorado, não há geração de potência ativa e em (a) a tensão é verificada sem carga, já em (b) uma carga de 1kW é conectada e pode-se evidenciar a queda de tensão provocada por ela.

Potência e Energia				
FUND 1:55:06				
	A	B	C	Total
kW				0.06
kVA				0.07
kVAR				÷ 0.03
PF				0.22
DPF				0.85
Arms	0.5	0.5	0.5	
	AB	BC	CA	
Vrms	224.5	221.3	222.8	
27/02/17 14:57:10 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(a) Tensão inicial sem carga $i_{qGSC}^* = 0A$.

Potência e Energia				
FUND 1:55:25				
	A	B	C	Total
kW				0.07
kVA				0.08
kVAR				÷ 0.01
PF				0.24
DPF				0.87
Arms	0.7	0.7	0.7	
	AB	BC	CA	
Vrms	216.1	213.0	214.7	
27/02/17 14:57:29 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(b) Tensão inicial com carga $i_{qGSC}^* = 0A$.

Figura 44: Tensão no PC e GSC carregando barramento CC.

Com a intenção de verificar a contribuição do GSC nesta situação, a referência de corrente de eixo em quadratura foi modificada, alterando para valores negativos e desta forma tornar o PC capacitivo. A Figura 45 apresenta o resultado, e fica evidente a recuperação parcial da tensão inicial no PC para cada referência de corrente considerada. Seria necessário implementar uma malha de controle de reativos que por sua vez fornecerá a referência para corrente de eixo em quadratura e assim poder atuar a partir de uma referência de potência, mantendo o funcionamento da malha de tensão inalterada.

De modo gráfico, é apresentado na Figura 46 um resumo da variação de tensão no PC com carga e a contribuição do GSC na regulação desta tensão. Considera-se então a tensão

Potência e Energia				
FUND		⊕	1:55:45	⊖ ⊞ ↺
A		B	C	Total
kW				0.06
kVA				0.27
kVAR				÷ 0.26
PF				0.14
DPF				0.22
Arms	1.0	0.9	1.0	
AB		BC	CA	
Vrms	216.7	213.9	215.2	
27/02/17 14:57:49 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

(a) $i_{qGSC}^* = -1A$.

Potência e Energia				
FUND		⊕	1:56:02	⊖ PF ⊞
A		B	C	Total
kW				0.06
kVA				0.53
kVAR				÷ 0.52
PF				0.08
DPF				0.11
Arms	1.7	1.5	1.7	
AB		BC	CA	
Vrms	217.1	214.7	215.8	
27/02/17 14:58:07 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

(b) $i_{qGSC}^* = -2A$.

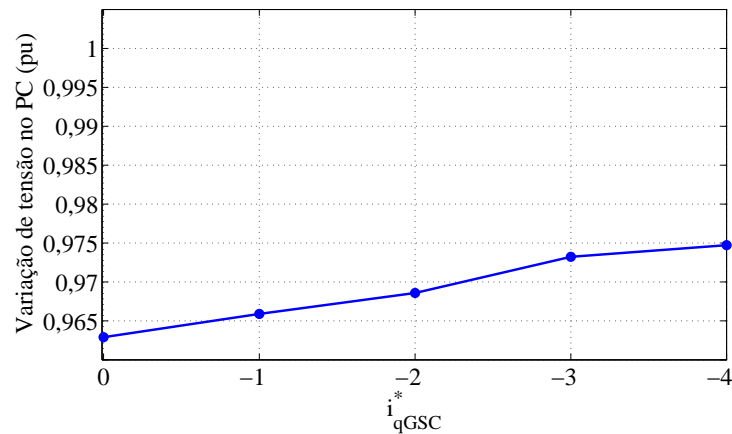
Potência e Energia				
FUND		1:56:20	⏏ ⏏ ⏏	
A		B	C	Total
kW				0.06
kVA				0.80
kVAR				÷ 0.80
PF				0.06
DPF				0.08
Arms	2.7	2.2	2.5	
AB		BC	CA	
Vrms	217.6	216.1	217.0	
27/02/17 14:58:25 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(c) $i_{qGSC}^* = -3A$.

Potência e Energia				
FUND		⊕	1:56:40	⊖ PF ⊞ ⊞
A		B	C	Total
kW				0.07
kVA				1.07
kVAR				÷ 1.07
PF				0.04
DPF				0.06
Arms	3.4	2.9	3.2	
AB		BC	CA	
Vrms	218.0	216.3	217.4	
27/02/17 14:58:44 240V 60Hz 3Ø DELTA DEFAULT*				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

(d) $i_{qGSC}^* = -4A$.Figura 45: Tensão no PC com carga e diferentes i_{qGSC}^* .

inicial média apresentada na Figura 45 (a) como sendo 1 pu, o efeito na queda de tensão com 3,9% proveniente da conexão da carga, é reduzido com a inserção de reativo capacitivo imposto pelo GSC.

Figura 46: Variação de tensão no PC com carga e diferentes i_{qGSC}^* .

Com a troca de reativos no PC, o GSC pode controlar a tensão no barramento CC e contribuir com a regulação de tensão do PC. Especialmente quando não há vento e o consumo do PC faz com que ocorra uma redução do nível de tensão, possibilitando através da potência capacitiva melhorar a qualidade de energia elevando a tensão do PC conforme é constatado no gráfico da Figura 46. Destaca-se que a capacidade da energia reativa em regular ou modificar a tensão no PC é menor do que o impacto que a inserção de potência ativa provoca.

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A verificação experimental do funcionamento do GIDA, é uma parte interessante e desafiadora do trabalho, ajustar as malhas de controle, conectá-lo a rede elétrica são etapas que compõem o momento preliminar. A realização de uma estrutura capaz de emular uma rede rural, proporcionando em um ambiente de laboratório testes de verificação da variação de tensão, pode ser algo inovador e bastante versátil para experimentar diversos tamanhos de redes conforme o desejado. Desta forma foi então experimentado os efeitos na tensão do PC com a inserção de potência ativa em uma rede rural de aproximadamente 3 km, bem como a redução na violação dos níveis de tensão ao inserir reativo indutivo.

Destaca-se a capacidade do GIDA em modificar a tensão no PC, sendo que a potência ativa apresenta o maior impacto neste parâmetro, o que torna-se importante frente a situações de consumo de potência ativa no PC. A característica indutiva do gerador, facilita a tornar a sua operação com FP indutivo, resultando em uma compensação da elevação de tensão provocada pela potência ativa injetada, embora a variação de tensão em função da energia reativa verificada seja menor frente a potência ativa.

Desta maneira verificaram-se os impactos da inserção de potência ativa e as possibilidades de compensação por meio da energia reativa mesmo em uma rede fraca com sua característica altamente resistiva.

7 CONCLUSÃO

O cenário energético nacional se apresenta favorável a inserção de fontes renováveis em GD. As normas brasileiras estão atualizadas e estimulam o incremento da GD. A preocupação com a qualidade de energia está presente e diversos fatores de qualidade são considerados nas normas vigentes. Os números confirmam a capacidade de expansão da matriz energética através de fontes renováveis e apontam para a grande capacidade a ser explorado por fontes eólicas.

A conexão de um GIDA requer atenção pelo fato de ter o estator conectado diretamente à rede e também o conversor parcial *back-to-back*. Um controle de potência ativa e reativa do estator foi projetado, no qual as variáveis de interesse do controlador, são as correntes rotóricas. Desta forma é possível ter o controle total do GIDA sobre os reativos trocados com a rede e a potência ativa injetada. Por outro lado, o conversor GSC que teve sua operação definida com FP unitário, também demonstrou-se possível modificar os reativos trocados com a rede para contribuir na regulação da tensão.

Uma rede rural foi emulada permitindo assim avaliar os impactos na variação de tensão no PC em um local remoto. A característica definida se aproxima de uma rede rural distante 3 km do alimentador. Os impactos causados pela conexão de um gerador em baixa tensão, está associada diretamente com a distância do transformador que o interliga e a potência a ser injetada. Na situação em que o gerador está inserindo potência ativa e não há consumo no PC, a elevação de tensão atingirá os maiores valores.

Em redes fracas, a variação na amplitude de tensão é obtida principalmente com a mudança da quantidade de potência ativa injetada na rede. O ângulo da rede diminui ao passo que aumentam-se as distâncias bem como reduz-se a quantidade de potência que pode ser adicionada ao PC para manter os níveis de tensão dentro de limites seguros estabelecidos na norma.

Uma equação para análise inicial de variação de tensão em função do comprimento da rede rural e da quantidade de potência inserida foi definida, e apesar da característica

predominantemente resistiva da rede, mostrou-se experimentalmente a possibilidade de contribuir com a regulação de tensão em função da troca de reativos. Tornando o PC indutivo obtém-se uma redução da tensão principalmente quando se está inserindo potência ativa e ainda é possível tornar o PC capacitivo para contribuir em situações em que a tensão no PC está abaixo da nominal.

A estrutura de controle implantada nesta plataforma experimental, pode facilmente ser utilizada em sistemas de maior potência, como é o caso da mini geração, acima de 75 kW, desta maneira a inserção de geradores nesta classe de potência também irá contribuir com a regulação de tensão no seu PC.

Sugestões para trabalhos futuros:

- i. Estudo comparativo de desempenho com outros controladores;
- ii. Implementar detecção de ilhamento;
- iii. Analisar o comportamento dinâmico do GIDA frente a afundamentos de tensão;
- iv. Definir uma interface de comunicação *wireless* com o sistema de controle que possibilite o acesso remoto.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 5383-1 Máquinas elétricas girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos - Ensaios**. Rio de Janeiro - RJ, fev. 2002.

ACKERMANN, T. Historical development and current status of wind power. In: ACKERMANN, T. (Ed.). **Wind Power in Power Systems**. Estocolmo, Suécia: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

AHUJA, H.; BHUVANESWARI, G.; BALASUBRAMANIAN, R. Performance comparison of DFIG and PMSG based WECS. In: **IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011)**. IET, 2011. p. P33–P33. ISBN 978-1-84919-536-2. ISSN 978-1-84919-536-2. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/IEECPS/v2011/iCP579/pP33/s1&Agg=doi/http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2011.0229>>.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482**. Abril 2012. Eletrônico.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 687**. Novembro 2015. Eletrônico.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica**. Janeiro 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/prodist>>.

ANEEL. **Unidades consumidoras com geração distribuída**. Abril 2017. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>.

BARBI, I. **Teoria fundamental do motor de indução**. Florianópolis: UFSC, 1985.

BARBI, I. et al. Retificadores PWM trifásicos unidirecionais com alto fator de potência. **REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA SOBRAEP**, v. 7, n. 1, p. 82, Novembro, 2002.

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

COSTA, J. P. da. **Contribuição ao estudo do gerador de indução duplamente alimentado: operação durante distúrbios na rede Elétrica**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, 2010.

DATTA, R.; RANGANATHAN, V. Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed wound rotor induction machine without position sensors. **Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)**, v. 4, p. 2623–2630, 1999. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=799208>>.

DIDA, A.; BENATTOUS, D. Fuzzy logic based sensorless mppt algorithm for wind turbine system driven dfig. In: **2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)**. IEEE, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7233139>>.

DIXON, J. W. Three-phase controlled rectifiers. In: RASHID, M. H. (Ed.). **Power Electronics Handbook**. 3. ed. Pensacola: Elsevier, 2011. cap. 12, p. 205–247.

ENGELHARDT, S. et al. Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generators. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 26, n. 1, p. 364–372, 2011. ISSN 08858969.

ESPINOZA, J. R. Inverters. In: RASHID, M. H. (Ed.). **Power Electronics Handbook**. 3. ed. Pensacola: Elsevier, 2011. cap. 15, p. 357–408.

FITZGERALD, A.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.

GONZÁLEZ, J. S.; ARÁNTGUI, R. L. Technological evolution of onshore wind turbines-a market-based analysis. **Wind Energy**, v. 19, n. 12, p. 2171–2187, dec 2016. ISSN 10954244. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/we.1974>>.

GWEC. **Global Wind Statistics 2016**. Bruxelas, fev. 2017. Disponível em: <<http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/>>. Acesso em: 14 mar. 2015.

HANSEN, A. D. Generators and power electronics for wind turbines. In: ACKERMANN, T. (Ed.). **Wind Power in Power Systems**. Estocolmo, Suécia: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

IEEE. **IEEE Std 112: Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. 3 Park Avenue, Nova Iorque, Novembro, 2004.

JACOBINA, C. B. et al. Sistema distribuído de geração elétrica com um gerador de indução trifásico interligado com uma rede monofásica. **Eletrônica de potência - SOBRAEP**, v. 11, n. 1, p. 43–51, março 2006.

KIM, J. et al. Adaptive Q-V Scheme for the Voltage Control of a DFIG-Based Wind Power Plant. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, n. 5, p. 3586–3599, may 2016. ISSN 0885-8993. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7214300>>.

KNUDSEN, H.; NIELSEN, J. N. Introduction to the modelling of wind turbines. In: ACKERMANN, T. (Ed.). **Wind Power in Power Systems**. Estocolmo, Suécia: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

KO, H.-S.; YOON, G.-G.; HONG, W.-P. Active use of dfig-based variable-speed wind-turbine for voltage regulation at a remote location. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 22, n. 4, p. 1916–1925, 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4349095>>.

KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D. **Analysis of Electric Machinery and Drives Systems**. 2. ed. Hoboken: IEEE PRESS, 2002.

LEI, T.; BARNES, M.; OZAKTURK, M. Doubly-fed induction generator wind turbine modelling for detailed electromagnetic system studies. **IET Renewable Power Generation**, v. 7, n. 2, p. 180–189, 2013. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rpg.2012.0222>>.

LI, S.; CHALLOO, R.; NEMMERS, M. J. Comparative study of dfig power control using stator-voltage and stator-flux oriented frames. **2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting**, p. 1–8, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5275874>>.

LIMA, F. K. de A. **Aerogerador baseado em máquina de indução duplamente alimentada - suportabilidade para afundamento de tensão**. Tese (Doutorado) — COPPE/UFRJ, Maio 2009.

LIMA, S. L. S.; DIAS, R. F. S.; WATANABE, E. H. Direct voltage control in ggrid with intermittent sources using UPFC. **Eletrônica de potência - SOBRAEP**, v. 19, n. 3, p. 260–267, agosto 2014.

LUND, T.; SØRENSEN, P.; EEK, J. Reactive power capability of a wind turbine with doubly fed induction generator. **Wind Energy**, v. 10, n. 4, p. 379–394, jul 2007. ISSN 10954244. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/we.228>>.

MACHADO, R. Q.; BUSO, S.; POMILIO, J. A. Sistema de geração distribuída utilizando gerador de indução trifásico e fontes CC conectado em rede monofásica. **Eletrônica de potência - SOBRAEP**, v. 1, n. 10, p. 51–58, junho 2005.

MARQUES, J. **Turbinas eeólica: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação**. Dissertação (Mestrado) — UFSM, 2004.

MOHAN, N. **Eletrônica de potência: curso introdutório**. 1. ed. Rio de Janeiro RJ: LTC, 2014. 241 p.

NAIDU, N. K. S.; SINGH, B. Experimental implementation of a doubly fed induction generator used for voltage regulation at a remote location. **2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)**, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7041994>>.

ONS. **Procedimentos de rede**. 2017. Eletrônico. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/>>.

ROCABERT, J.; LUNA, A.; BLAABJERG, F. Control of power converters in ac microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 11, p. 4734–4749, 2012. ISSN 0885-8993.

SANDHYA, T.; CHANDAN, K. S. Control and operation of opti-slip induction generator in wind farms. **2011 International Conference on Computer, Communication and Electrical Technology (ICCCET)**, p. 450–454, 2011.

SINGH, P.; KAUR, A. Power control of doubly fed induction generator (DFIG) using back to back converters (PWM technique). **IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT) Power**, p. 73–77, 2014.

SLOOTWEG, J.; POLINDER, H.; KLING, W. Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator. In: **2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)**. IEEE, 2001. v. 1, p. 644–649 vol.1. ISBN 0-7803-7173-9. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=970114>>.

ÅSTRÖM K. J.M, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID Controllers - Theory, Design, and Tuning**. 2^a ed.. ed. [S.l.]: ISA, 1995. ISBN 978-1-61583-599-7, 978-0-471-49049-4, 1-55617-516-7.

SUN, Y. zhang et al. A review on the integration of wind farms with variable speed wind turbine systems into power systems. **2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**, 2009.

TAZIL, M. et al. Three-phase doubly fed induction generators: an overview. **IET Electric Power Applications**, v. 4, n. 2, p. 75, 2010.

TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 407 p.

TIAN, J.; SU, C.; CHEN, Z. Reactive power capability of the wind turbine with Doubly Fed Induction Generator. **IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, p. 5312–5317, 2013. ISSN 1553-572X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6699999>>.

VESTAS. **World's most powerful wind turbine now operational.** Dinamarca, Janeiro 2014. Disponível em: <<http://www.vestas.com/en/media/media/eaf56b4c49964c8faf5f550ad0b1dec0.ashx>>. Acesso em: 26 jun. 2015.

VIAJANTE, G. P. et al. Estratégia de conexão à rede elétrica do gerador a relutância variável para injeção de potência ativa. **Eletrônica de potência - SOBRAEP**, v. 19, n. 2, p. 123–131, maio 2014.

VOLTOLINI, H. **Modelagem e controle de geradores de indução duplamente alimentados com aplicação em sistemas eólicos**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, Março 2007.

ZHANG, L.; BOLLEN, M. H. J. Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, v. 15, n. 2, p. 827–832, abril 2000.

ZHAO, Y. et al. Maximal power point tracking under speed-mode control for wind energy generation system with doubly fed introduction generator. In: **2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference**. IEEE, 2006. v. 00. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4777975>>.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

A.1 PARÂMETROS DO GIDA

Para o desenvolvimento dos testes a nível experimental, foi utilizado o conjunto apresentado na Figura 47, composto de um motor de indução com rotor em gaiola de esquilo e o GIDA, que estão acopladas mecanicamente através do eixo do rotor e possuem potência de 3 kW. A máquina na parte central não será utilizada nos experimentos.

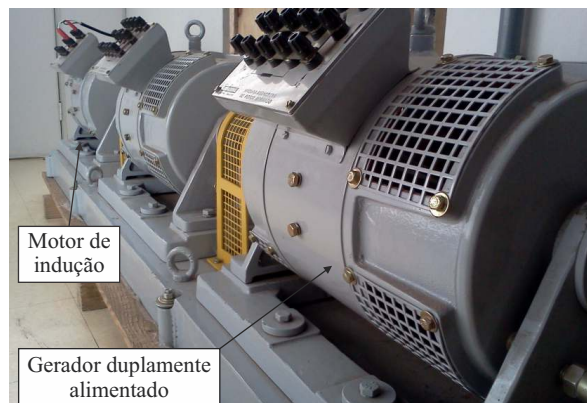


Figura 47: Conjunto motor de indução e gerador duplamente alimentado.

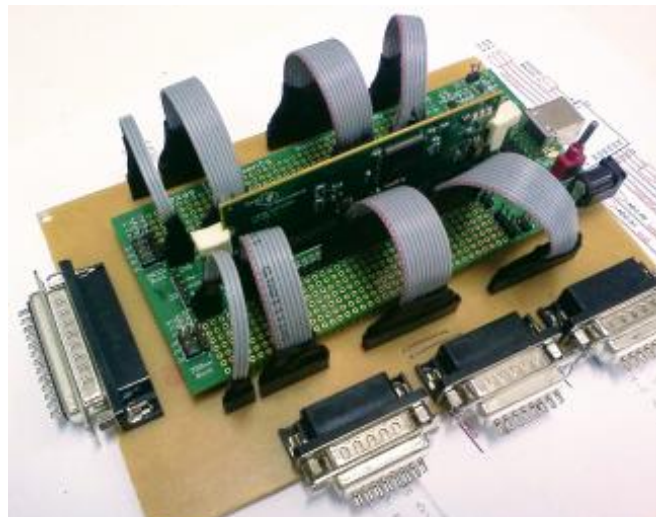
Foram realizados ensaios no GIDA para obter os valores de resistência e indutância, de modo a conhecer estes parâmetros que são utilizados no projeto dos controladores conforme abordado no Capítulo 5. O resultado dos parâmetros obtidos experimentalmente estão apresentados na Tabela 7 e o método utilizado foi baseado nas normas IEEE Std 112 (2004) e NBR 5383 (2002).

O controle vetorial implementado digitalmente, foi realizado com DSP Piccolo F28069 em uma plataforma de desenvolvimento da Texas Instruments chamada “*Experimenter Kit*”. A Figura 48 mostra o Piccolo conectado ao *Experimenter Kit*, que possui comunicação USB com o computador para o desenvolvimento do *software*.

Ainda na Figura 48 observa-se que foi projetada uma placa para realizar a conexão do Piccolo e assim ter o acesso aos pinos através de conexões DB15 e DB25, o que facilita a

Tabela 7: Parâmetros do GIDA

Parâmetros	Símbolo	Valor
Dados nominais de placa		
Potência nominal	P_g	3,0 kW
Tensão do estator	V_s	220 V
Tensão do rotor	V_r	156 V
Corrente do estator	I_s	11,2 A
Corrente do rotor	I_r	12 A
Número de polos	P	4
Velocidade nominal	n_n	1800 rpm
Dados ensaiados		
Resistência do estator	R_s	1,201 Ω
Resistência do rotor	R'_r	1,201 Ω
Indutância de dispersão do estator	L_{l_s}	6,950 mH
Indutância de dispersão do rotor	L'_{l_r}	6,950 mH
Indutância mútua	M	153,060 mH

**Figura 48: Piccolo F28069.**

conexão com outros periféricos, acionamento PWM, leitura de sinais analógicos e outros sinais digitais necessários.

A.2 PARÂMETROS GERAIS

Na Tabela 8, são apresentados os parâmetros adicionais da plataforma experimental. Os parâmetros do filtro indutivo, rede rural, valores de base são definidos.

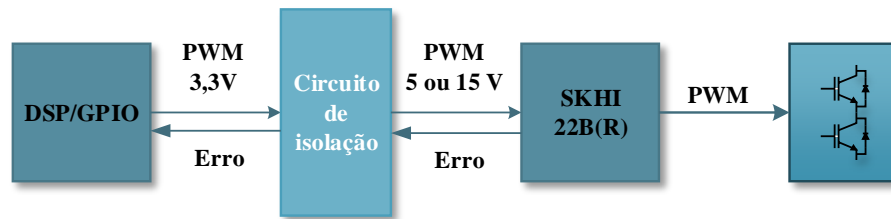
Tabela 8: Parâmetros gerais

Parâmetros	Símbolo	Valor
Dados filtro indutivo		
Indutância do filtro	L_f	1,65 mH
Resistência do filtro	R_f	41 mΩ
Rede rural		
Indutância da rede	L_l	11,2 A
Resistência da rede	R_l	12 A
Valores de base		
Potência de base	P_b	3000 W
Tensão de base	V_b	220 V
Corrente de base	I_b	P_b/V_b A
Impedância de base	Z_b	V_b/I_b Ω
Velocidade de base	v_b	1800 rpm
Operação dos conversores e discretização		
Frequência de amostragem	f_a	6 kHz
Frequência de chaveamento	f_s	6 kHz

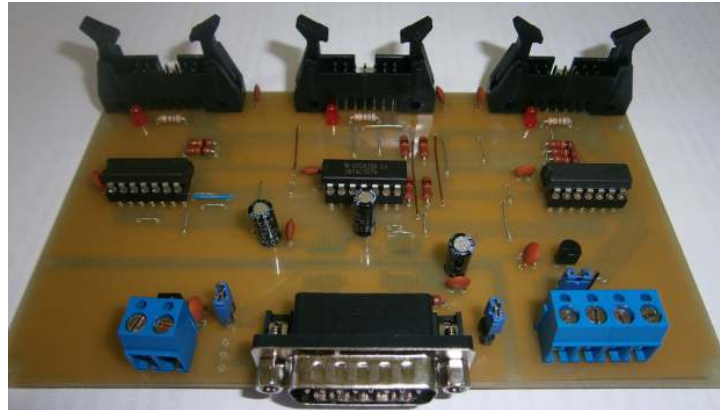
A.3 HARDWARE DESENVOLVIDO

Para que o DSP utilizado possa controlar este conversor, é necessário uma placa auxiliar que faz a isolamento do DSP aos *drivers* dos IGBT's. Este circuito foi concebido de forma a proporcionar o bloqueio dos IGBT's quando não houver conexão com o DSP ou mesmo caso apresente algum problema de funcionamento. Como isolamento, é utilizado o circuito integrado ADUM640X que é conectado através de um circuito lógico que converte a saída dos sinais em 5 ou 15 V_{cc} , de acordo com a seleção, proporcionando maior compatibilidade com outros modelos de *drivers* disponíveis para uso em aplicações similares. O diagrama de bloco é apresentado na Figura 49 (a) e a placa visualiza-se na Figura 49 (b). São utilizadas duas placas para poder acionar o conversor *back-to-back*, pois cada placa tem capacidade para três braços de transistores IGBT, portanto uma placa acionará o RSC e a outra o GSC.

O *encoder* utilizado é do tipo absoluto da Hengstler modelo AC 58 com 12 bits saída paralela e alimentação em 12 Vcc. Além dos 12 bits de dados, tem opções de controle como direção, *data latch* e *tristate*. Desta forma para estabelecer uma comunicação adequada com o DSP, é necessário o desenvolvimento de um circuito para tal.



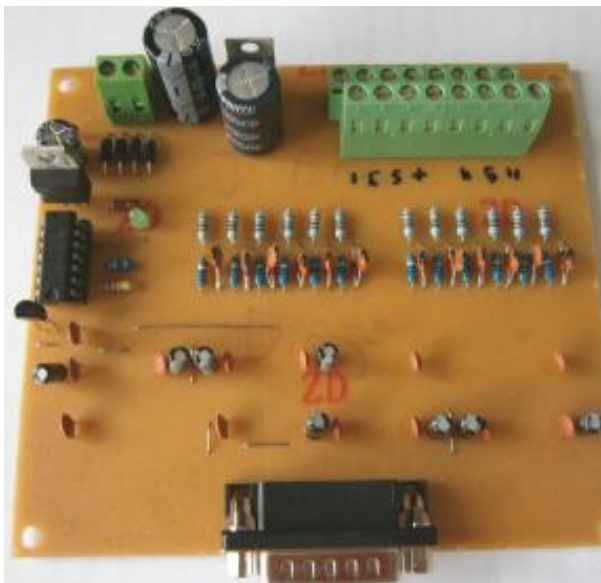
(a) Diagrama de blocos



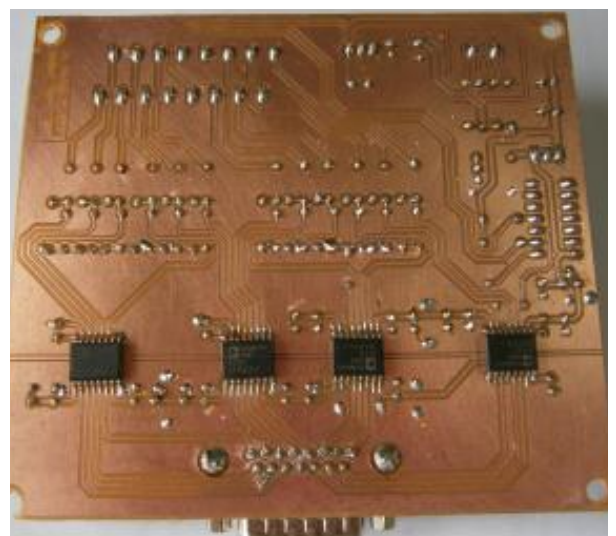
(b) Placa de circuito impresso

Figura 49: Placa de isolamento DSP-driver.

O circuito foi projetado de modo a oferecer a comunicação isolada entre *encoder* e DSP de forma a proporcionar uma segurança na operação do DSP devido a sensibilidade de suas GPIO frente a variações de tensão. Na Figura 50 é exibido a placa que fora projetada e montada para esta aplicação.



(a) Vista superior.



(b) Vista inferior.

Figura 50: Placa eletrônica desenvolvida para interface entre *encoder* e DSP.

Foram montadas outras placas para leitura das correntes, e condicionamento de sinais analógicos de projetos realizados por outros alunos do programa de mestrado. No painel exibido na Figura 51 foram montadas essas placas, o conversor *back-to-back* e o barramento CC são apresentados na parte central, bem como contadores de conexão e as proteções termomagnéticas. Os sensores de corrente, tensão, o sistema de condicionamento de sinais e DSP são apresentados.

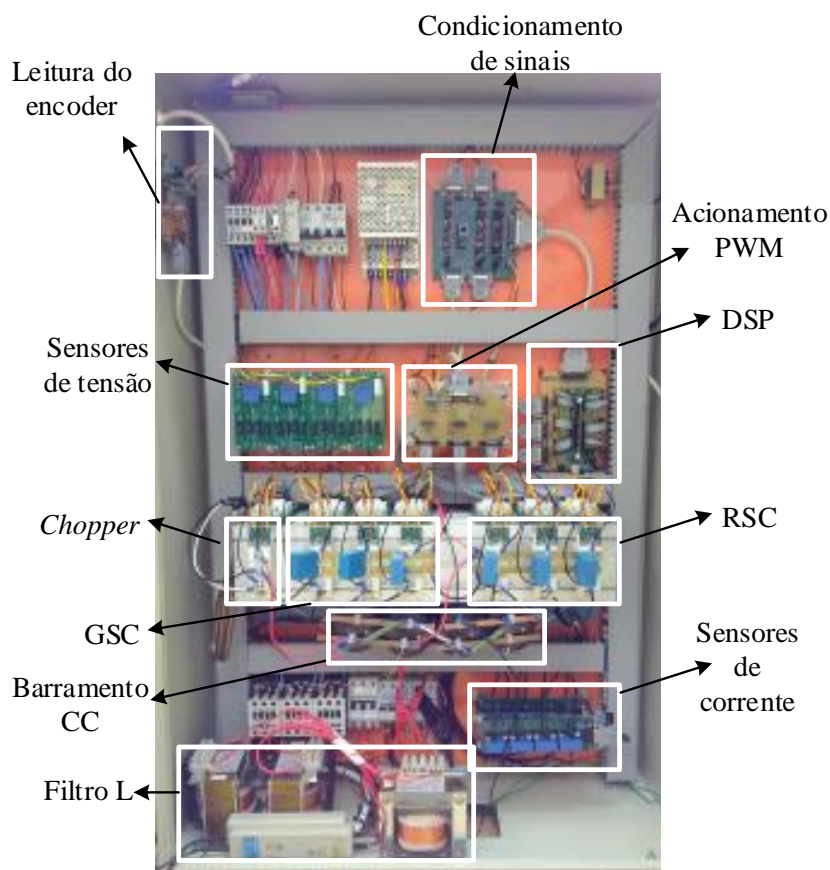


Figura 51: Painel de comando e controle.

São dispostos seis módulos IGBT's sobre o dissipador com dois transistores cada formando o conversor *back-to-back*, sendo que para cada módulo é utilizado um *driver* da Semikron modelo SKHI-22BR. Eles acionam os transistores de forma complementar e implementam um tempo morto por meio do próprio *hardware*.

Desempenhando uma importante etapa para a obtenção dos resultados experimentais, a montagem da rede rural exige cautela para poder criar em laboratório, um comportamento muito próximo de um cabo real. Com o uso de indutores monofásicos com 4 possibilidade de valores de indutância e ainda, um reostato trifásico conforme é apresentado na Figura 52, foi possível então ajustar os parâmetros da impedância de linha necessário para os ensaios, sendo $1,5 \, \Omega$ para a parte resistiva e $900 \, \text{mH}$ representando uma rede rural típica com 3 km de extensão.



Figura 52: Rede rural formada pelo reostato e indutores.

A visão geral da plataforma montada e utilizada em todos os ensaios experimentais, é apresentada na Figura 53.



Figura 53: Visão geral da montagem da plataforma experimental.