

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Josmar Ivanqui

**CONTROLE DE GERADORES SÍNCRONOS COM ÍMÃS  
PERMANENTES EM AEROGERADORES SOB  
CONDIÇÕES DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO DA  
REDE ELÉTRICA:  
FALHAS SIMÉTRICAS E ASSIMÉTRICAS**

Florianópolis

2014



Josmar Ivanqui

**CONTROLE DE GERADORES SÍNCRONOS COM ÍMÃS  
PERMANENTES EM AEROGERADORES SOB  
CONDIÇÕES DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO DA  
REDE ELÉTRICA: FALHAS SIMÉTRICAS E  
ASSIMÉTRICAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica para  
a obtenção do Grau de Doutor em En-  
genharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renato Carlson

Coorientador: Prof. Dr. Hélio Voltolini

Florianópolis

2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da  
Biblioteca Universitária da UFSC.

Ivanqui, Josmar

Controle de geradores síncronos com ímãs permanentes em aerogeradores sob condições de afundamento de tensão da rede elétrica: Falhas simétricas e assimétricas / Josmar Ivanqui; orientador, Renato Carlson; coorientador, Hélio Voltolini. - Florianópolis, SC, 2014.

146 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Aerogeradores. 3. Geradores síncronos de ímãs permanentes. 4. Teoria PQ. 5. Afundamento de tensão. I. Carlson, Renato. II. Voltolini, Hélio. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Josmar Ivanqui

**CONTROLE DE GERADORES SÍNCRONOS COM ÍMÃS  
PERMANENTES EM AEROGERADORES SOB  
CONDIÇÕES DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO DA  
REDE ELÉTRICA: FALHAS SIMÉTRICAS E  
ASSIMÉTRICAS**

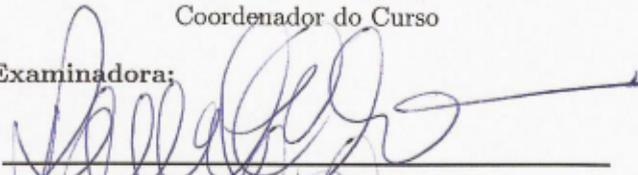
Esta Tese foi julgada aprovada para a obtenção do Título de  
"Doutor em Engenharia Elétrica", e aprovada em sua forma final pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 12 de dezembro 2014.

---

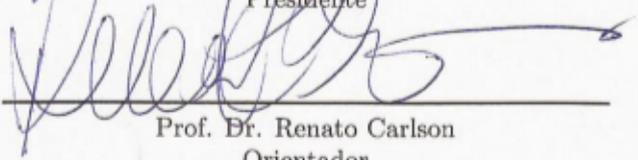
Prof. Chefe, Dr. Carlos Galup Montoro  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



---

Prof. Renato Carlson  
Presidente



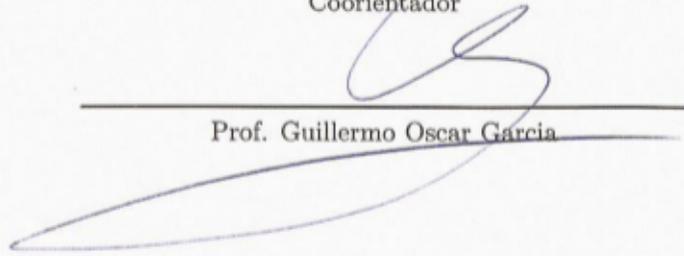
---

Prof. Dr. Renato Carlson  
Orientador



---

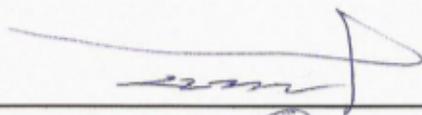
Prof. Dr. Hélio Voltolini  
Coorientador



---

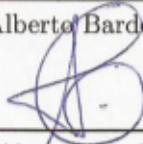
Prof. Guillermo Oscar Garcia





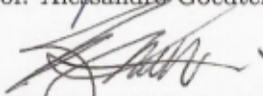
---

Prof. Flávio Alberto Bardemaker Batista



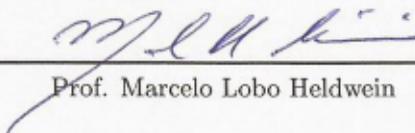
---

Prof. Alessandro Goedtel



---

Prof. Nelson Sadowski



---

Prof. Marcelo Lobo Heldwein



A Deus, pela vida.

A família, pelo amor.

E a companheira de todas as horas, à mi-  
nha esposa, Conceição.



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor Renato Carlson, orientador deste trabalho, e ao professor Hélio Voltolini, o co-orientador, pela enorme disponibilidade e dedicação demonstrados no esclarecimento de dúvidas, na resolução dos problemas que foram surgindo, bem como todas as sugestões prestadas no desenvolvimento do trabalho e na elaboração desta tese.

À minha esposa Conceição, essencialmente pelo suporte psicológico que sempre me proporcionou, sem o qual este trabalho teria sido impossível.

Em especial ao amigo Percio Luiz Karam de Miranda, que ao longo deste último ano, contribuiu em muito na montagem e aquisição dos dados. E também Marcelo Henrique Granza quem muito colaborou.

Aos meus familiares, pelo incentivo em todas as conquistas de minha vida.

Aos professores da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Aos colegas do Grupad pelo apoio, durante a execução dos créditos.

Aos colegas de trabalho também pelo apoio, durante toda a execução deste trabalho.

A todas as pessoas que de uma forma direta ou indireta contribuíram para que este trabalho se tornasse possível.

E finalmente, meu agradecimento ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo aporte financeiro que viabilizou a execução deste projeto.



*É melhor lançar-se à luta em busca do triunfo mesmo expondo-se ao insucesso, que formar fila com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito; e vivem nessa penumbra cinzenta sem conhecer vitória nem derrota.*

Franklin Roosevelt



## RESUMO

Esta tese propõe um novo sistema de controle baseado na Teoria da Potência Instantânea para um aerogerador com um gerador síncrono de ímãs permanentes (GSIP). Este gerador possui uma força eletromotriz trapezoidal por esta razão o controle proposto traz vantagens em relação aos usuais baseados na transformação de Park. Uma bancada de ensaios foi montada para a validação dos resultados simulados. Utilizou-se um conversor de frequência comandado por um controlador lógico programável (CLP) e estes conectados a uma máquina síncrona de ímãs permanentes, como simulador da turbina eólica, com a finalidade de produzir energia, para acionar o GSIP de 3 kW. O GSIP converte a energia rotacional mecânica em energia elétrica. Dois conversores do tipo fonte de tensão, conectados em topologia *back-to-back*, são utilizados para conectar este gerador à rede elétrica, nos quais o disparo das chaves se dá por modulação PWM vetorial (SV-PWM). A estratégia de controle do conversor do lado do gerador foi implementada com um dSPACE, enquanto que o conversor do lado da rede foi controlado por um DSP. Para garantir a estabilidade do controle da corrente do gerador em toda a sua faixa de potência, determinou-se matematicamente, em função da posição do rotor, a força eletromotriz (FEM) do GSIP. O sistema se auto ajusta para transferir o máximo de potência à rede em função da velocidade do vento. A tensão do barramento de corrente contínua (CC) tem seu controle pelo conversor do lado do gerador garantindo a estabilidade do sistema frente a afundamentos simétricos e assimétricos da tensão da rede elétrica. São apresentados resultados de simulação em ambiente Matlab/Simulink, e experimentais coletados na bancada. Com os resultados fica evidente a possibilidade de implantar este sistema com a finalidade de garantir a qualidade de energia de um sistema de geração acoplado à rede elétrica, bem como cumprir as exigências impostas pelas agências reguladoras das concessionárias de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Aerogeradores. Geradores síncronos de ímãs permanentes. Teoria “PQ” e afundamento de tensão.



## ABSTRACT

This thesis proposes a new control system based on the Theory of Instantaneous Power for a wind turbine with a permanent magnet synchronous generator (PMSG). This generator has a trapezoidal electromotive force, for this reason the proposed control brings advantages over the usual one based on the Park transformation. A test bench was set to validate the simulated results. We used an electrical drive controlled by a programmable logic controller (PLC) and these are connected to a permanent magnet synchronous machine, as a wind turbine simulator, in order to produce power to drive the 3 kW PMSG. The PMSG converts mechanical rotational energy into electrical energy. Two voltage source converters connected in back-to-back topology, are used to connect the generator to the grid, in which the switching is space vector modulated (SV-PWM). The control strategy of the generator-side converter has been implemented with a DSpace, while the network side converter is controlled by a DSP. To ensure the generator current control stability in its entire power band, the PMSG electromotive force (FEM) was determined mathematically as a function of the rotor position. The system automatically adjusts itself to transfer the maximum power to the network as a function of the wind speed. The generator-side converter control of the DC bus voltage ensures the stability of the system when facing symmetrical and asymmetrical voltage sags at the grid terminals. Matlab/Simulink simulation results are presented as well as experimental ones collected on the test bench. With the results it is evident the effectiveness of implementing this system in order to ensure the quality of energy of a generation system coupled to the power grid, as well as meet the requirements imposed by regulatory agencies of electricity concessionaires

**Keywords:** Wind Turbine. synchronous generator of permanent magnets. PQ theory. voltage sag.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Capacidade eólica global instalada (1996 - 2012). . . . .	33
Figura 2	Oferta interna de eletricidade no Brasil. . . . .	35
Figura 3	Sistema completo geração eólica. . . . .	35
Figura 4	Normas das principais concessionárias de alguns países. . . . .	43
Figura 5	Norma Brasil. . . . .	44
Figura 6	Comportamento de $C_p$ em função de $\lambda$ e $\beta$ . . . . .	47
Figura 7	Comportamento de $C_p$ para $\beta = 0$ em várias velocidades e rastreamento MPPT. . . . .	48
Figura 8	Modelo do simulador da turbina eólica. . . . .	49
Figura 9	Valores limites. . . . .	49
Figura 10	Modelo do gerador síncrono de ímãs permanentes. . . . .	52
Figura 11	Circuito equivalente trifásico do MSIP. . . . .	54
Figura 12	Transformada de Clarke. . . . .	56
Figura 13	Modulação linear do SV-PWM . . . . .	59
Figura 14	Modelo completo de geração de energia eólica. . . . .	59
Figura 15	Diagrama de bloco do CCLG . . . . .	61
Figura 16	Tensão lida em uma fase com 100% de carga. . . . .	62
Figura 17	FEM trapezoidal . . . . .	63
Figura 18	Diagrama de bloco completo do lado do gerador. . . . .	64
Figura 19	Malha de controle da planta. . . . .	66
Figura 20	Mapa do lugar das raízes. . . . .	67
Figura 21	Diagrama de controle da rede. . . . .	72
Figura 22	Circuito equivalente trifásico da rede. . . . .	72
Figura 23	Transformada de Park. . . . .	73
Figura 24	Comutação de Potência ativa e reativa. . . . .	78
Figura 25	Sistema de extração sequência positiva e negativa e controle. . . . .	82
Figura 26	Diagrama de simulação do controle do lado do gerador. . . . .	84
Figura 27	Diagrama de simulação do controle do lado da rede. . . . .	84
Figura 28	Diagrama do MPPT, DPLL e corrente $I_{dq}$ de referência da sequência positiva do lado da rede. . . . .	85
Figura 29	Diagrama de corrente $I_{dq}$ de referência da sequência negativa do lado da rede. . . . .	86

Figura 30 Diagrama de simulação do controle e geração SV-PWM do lado da rede.....	87
Figura 31 MPPT do degrau de vento comparado com as curvas de ventos.....	88
Figura 32 FEM: medida e reconstruída.....	89
Figura 33 Tensão de fase e corrente em detalhes na rede.....	89
Figura 34 Corrente de controle em $I_d$ e $I_q$ de sequência positiva..	90
Figura 35 Corrente de controle em $I_d$ e $I_q$ de sequência negativa..	91
Figura 36 Tensão de fase e corrente no gerador.....	91
Figura 37 Corrente de controle em $I_\alpha$ e $I_\beta$ no gerador.....	92
Figura 38 Tensão $V_{cc}$ e velocidade mecânica de rotação.....	93
Figura 39 Potência: mecânica, do gerador e da rede.....	94
Figura 40 Tensão instantânea $V_{abc}$ durante o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.....	95
Figura 41 Tensão instantânea $V_{abc}$ em detalhes no início do afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.....	95
Figura 42 Tensão instantânea $V_{abc}$ em detalhes no final do afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.....	96
Figura 43 Corrente de controle de sequência positiva nos eixos $dq$ em detalhes no início do afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.....	96
Figura 44 Corrente de controle de sequência negativa nos eixos $dq$ em detalhes no início do afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.....	97
Figura 45 Tensão no barramento CC e velocidade de rotação mecânica durante o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.....	97
Figura 46 Potência mecânica, do gerador e da rede durante o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.....	98
Figura 47 Tensão de sequência negativa nos eixos $dq$ no afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.....	99
Figura 48 Tensão de sequência negativa nos eixos $dq$ no afundamento (0,2-0,2-1,0)pu.....	99
Figura 49 Tensão de sequência negativa nos eixos $dq$ no afundamento (0,2-1,0-1,0)pu.....	100
Figura 50 Degrau de 5 m/s para 8 m/s e de 8 m/s para 5 m/s....	102
Figura 51 Tensão de fase, corrente e FEM no gerador.....	103
Figura 52 Detalhe no início do afundamento da rede da tensão e corrente na fase A.....	104

Figura 53 Detalhe no final do afundamento da rede da tensão e corrente na fase A. ....	104
Figura 54 Controle de corrente $I_d$ em detalhe no início do afundamento. ....	105
Figura 55 Controle de corrente $I_d$ no final do afundamento. ....	105
Figura 56 Controle de corrente $I_q$ em detalhe no início do afundamento. ....	105
Figura 57 Controle de corrente $I_q$ em detalhe no final do afundamento. ....	106
Figura 58 Detalhe no início do afundamento do gerador da tensão e corrente da fase A. ....	106
Figura 59 Detalhe no final do afundamento do gerador da tensão e corrente da fase A. ....	107
Figura 60 Controle da corrente $I_\alpha$ em detalhe no início do afundamento. ....	107
Figura 61 Controle da corrente $I_\alpha$ em detalhe no final do afundamento. ....	108
Figura 62 Controle da corrente $I_\beta$ em detalhe no início do afundamento. ....	108
Figura 63 Controle da corrente $I_\beta$ em detalhe no final do afundamento. ....	109
Figura 64 Comutação entre a potência ativa e reativa. ....	109
Figura 65 Tensão $V_{cc}$ e a rotação. ....	110
Figura 66 Tensão instantânea $V_{abc}$ num afundamento (0,2-0,5-0,7)pu. ....	111
Figura 67 Tensão instantânea $V_{abc}$ em detalhes de entrada num afundamento (0,2-0,5-0,7)pu. ....	111
Figura 68 Corrente instantânea $I_{abc}$ num afundamento (0,2-0,5-0,7)pu. ....	112
Figura 69 Corrente instantânea $I_{abc}$ em detalhes de entrada num afundamento (0,2-0,5-0,7)pu. ....	112
Figura 70 Tensão $V_{cc}$ e a tensão eficaz durante todo o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu. ....	113
Figura 71 Potências durante todo o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu. ....	113
Figura 72 Detalhe na corrente $I_d^+$ e $I_d^-$ medida e de referência no afundamento (0,2-0,5-0,7)pu. ....	114
Figura 73 Detalhe na corrente $I_q^+$ e $I_q^-$ medida e de referência no afundamento (0,2-0,5-0,7)pu. ....	114

Figura 74	Tensão $V_d^+$ e $V_d^-$ no afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.....	115
Figura 75	Tensão $V_d^+$ e $V_d^-$ no afundamento (0,2-0,2-1,0)pu.....	115
Figura 76	Tensão $V_d^+$ e $V_d^-$ no afundamento (0,2 - 1,0 - 1,0)pu. . .	116
Figura 77	Representação geral da alimentação no Gerador.....	118
Figura 78	Representação geral do sistema de alimentação da rede	120
Figura 79	Foto do simulador eólico.....	129
Figura 80	Foto da bancada do motor e gerador.....	130
Figura 81	Painel de controle DSpace e DSP.....	130
Figura 82	Foto geral da bancada. ....	131
Figura 83	Foto geral da bancada vista lateral.....	131
Figura 84	Sistema de modelo assimétrico.....	139
Figura 85	Sistema de sequência positiva.....	140
Figura 86	Sistema de sequência negativa.....	141
Figura 87	Sistema de sequência zero.....	142
Figura 88	Sistema de sequência composto.....	143

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Definição de distúrbios no sistema de potência. ....	42
Tabela 2	Coeficientes. ....	47
Tabela 3	Valores medidos de potência. ....	117
Tabela 4	Rendimento: geral, dos conversores e do gerador. ....	117
Tabela 5	Parâmetros da turbina. ....	135
Tabela 6	Parâmetros do conjunto conversor e gerador. ....	135
Tabela 7	Parâmetros do conjunto conversor, rede e filtro. ....	135
Tabela 8	Parâmetros do elo CC. ....	136



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GSIP	Gerador Síncrono com Ímãs Permanentes .....	34
CC	Corrente contínua.....	36
RMS	Valor eficaz (Root Medium Square) .....	41
MPPT	Rastreamento do ponto de máxima potência (Maximum Power Point Traking).....	47
FEM	Força eletromotriz .....	51
PWM	Modulação por largura de pulso (Pulse Width Modulation) .....	58
SV-PWM	Space Vector - Pulse Width Modulation.....	58
CLG	Conversor do lado do gerador .....	60
CCLG	Controle do conversor do lado do gerador .....	60
CLR	Conversor do lado da rede .....	60
CCLR	Controle do conversor do lado da rede.....	60
FPB	Filtro passa baixa.....	60
PI	Proporcional integral.....	64
PLL	Malha de detecção de fase (Phase Locked Loop).....	74
DPLL	Malha de detecção de fase digital (Digital Phase Locked Loop) .....	74
DSP	Processador digital de sinais (Digital Signal Processors)	77



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Razão de velocidade de ponta de pá .....	45
R	Raio da turbina .....	45
$\omega_T$	Velocidade angular da turbina .....	45
$V_v$	Velocidade do vento .....	45
$T_m$	Conjugado mecânico .....	46
$\rho$	Densidade do ar .....	46
A	Área varrida pelas pás da turbina .....	46
$C_p$	Coeficiente de potência .....	46
$\beta$	Ângulo de passo da turbina .....	46
$P_m$	Potência mecânica .....	46
$\lambda_{tsa}$	Fluxo magnético total concatenado pela fase A do estator .	52
$\lambda_{tsb}$	Fluxo magnético total concatenado pela fase B do estator ..	52
$\lambda_{tsc}$	Fluxo magnético total concatenado pela fase C do estator .	52
$\lambda_{sa}$	Fluxo magnético concatenado pela fase A do estator, oriun- dos do estator .....	52
$\lambda_{sb}$	Fluxo magnético concatenado pela fase B do estator, oriun- dos do estator .....	52
$\lambda_{sc}$	Fluxo magnético concatenado pela fase C do estator, oriun- dos do estator .....	52
$\lambda_{ra}$	Fluxo magnético concatenado pela fase A do estator, oriun- dos dos ímãs do rotor .....	52
$\lambda_{rb}$	Fluxo magnético concatenado pela fase B do estator, oriun- dos dos ímãs do rotor .....	52
$\lambda_{rc}$	Fluxo magnético concatenado pela fase C do estator, oriun- dos dos ímãs do rotor .....	52
$R_s$	Resistência de uma fase do estator .....	53
$v_{ga}$	Tensão aplicada à fase A do estator .....	53
$v_{gb}$	Tensão aplicada à fase B do estator .....	53
$v_{gc}$	Tensão aplicada à fase C do estator .....	53
$i_{ga}$	Corrente na fase A do estator .....	53
$i_{gb}$	Corrente na fase B do estator .....	53
$i_{gc}$	Corrente na fase C do estator .....	53
L	Matriz de indutâncias do estator .....	53

$L_{sa}$	Indutância própria na fase A do estator .....	53
$L_{sb}$	Indutância própria na fase B do estator .....	53
$L_{sc}$	Indutância própria na fase C do estator .....	53
$M_{ab}$	Indutância mútua entre as fases AB .....	53
$M_{bc}$	Indutância mútua entre as fases BC .....	53
$M_{ac}$	Indutância mútua entre as fases AC .....	53
$e_{ga}$	Tensão induzida na fase A do estator devido ao movimento do rotor e ao campo gerado pelos ímãs do rotor .....	54
$e_{gb}$	Tensão induzida na fase B do estator devido ao movimento do rotor e ao campo gerado pelos ímãs do rotor .....	54
$e_{gc}$	Tensão induzida na fase C do estator devido ao movimento do rotor e ao campo gerado pelos ímãs do rotor .....	54
$\omega_m$	Velocidade angular mecânica do rotor .....	55
$\theta_m$	Posição mecânica do rotor .....	55
$J$	Inércia .....	57
$N_{pp}$	Número de pares de polos .....	57
$\omega_{ge}$	Velocidade angular elétrica do gerador .....	57
$B_m$	Coefficiente de atrito .....	57
$T_L$	Conjugado de carga .....	57
$T_e$	Conjugado eletromagnético .....	57
$V_m$	Módulo da tensão de fase máxima aplicada .....	58
$V_{cc}$	Tensão contínua no elo CC .....	58
$R_f$	Resistência do filtro passa baixa .....	61
$C_f$	Capacitor do filtro passa baixa .....	61
$f_g$	Frequência da tensão do gerador .....	62
$\tau$	Constante de tempo .....	65
$K_p$	Constante proporcional .....	65
$K_i$	Constante integral .....	65
$T_i$	Tempo de integração .....	65
$A_c$	Ganho do conversor SV-PWM .....	65
$i_{rd}$	Componente da corrente direta da rede .....	71
$i_{rq}$	Componente da corrente em quadratura da rede .....	71
$R_r$	Resistência do filtro da rede .....	71
$L_r$	Indutância do filtro da rede .....	71
$P_{rede}^{ref}$	Potência de referência da rede .....	71

$E_{rx}$	Tensão da fase A, B e C da rede.....	71
$E_{rn}$	Tensão de neutro da rede.....	71
$V_{abr}$	Tensão da fase A e B no sensor da rede.....	71
$I_{abr}$	Corrente da fase A no sensor da rede.....	71
$v_{rd}$	Componente da tensão direta da rede.....	74
$v_{rq}$	Componente da tensão em quadratura da rede.....	74
$\theta_{re}$	Posição angular elétrica da rede.....	75
$\omega_{re}$	Velocidade angular elétrica da rede.....	75
$f_{cr}$	Frequência de operação do indutor.....	76
$i_{mo}$	Corrente máxima de ondulação.....	76



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	33
1.1 PRELIMINARES .....	33
1.2 OBJETIVO GERAL .....	37
<b>1.2.1 Objetivos específicos</b> .....	37
1.3 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO .....	37
1.4 ORGANIZAÇÃO DO MANUSCRITO .....	37
1.5 LISTA DE TRABALHOS PUBLICADOS .....	38
1.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	39
<b>2 QUALIDADE DE ENERGIA</b> .....	41
2.1 INTRODUÇÃO .....	41
2.2 DEFINIÇÃO DE DISTÚRBIOS DE TENSÃO .....	41
2.3 NORMAS SOBRE O AFUNDAMENTO DE TENSÃO .....	41
2.4 VALORES CARACTERÍSTICOS DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO .....	42
2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	44
<b>3 SISTEMAS DE ENERGIA EÓLICA</b> .....	45
3.1 INTRODUÇÃO .....	45
3.2 PRINCÍPIOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA .....	45
<b>3.2.1 Potência de uma turbina eólica</b> .....	45
<b>3.2.2 Rastreamento do ponto de maior potência</b> .....	47
3.3 MODELO IMPLEMENTADO DE TURBINA EÓLICA .....	48
3.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	49
<b>4 CONVERSOR DO LADO DO GERADOR</b> .....	51
4.1 INTRODUÇÃO .....	51
4.2 GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES .....	51
4.3 MODELAGEM DO GSIP .....	51
<b>4.3.1 Transformada de Clarke</b> .....	55
4.4 TEORIA $PQ$ .....	57
4.5 MODULAÇÃO VETORIAL POR LARGURA DE PULSO .....	58
4.6 DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA EÓLICO .....	58
4.7 CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DO GERADOR .....	60
<b>4.7.1 Dimensionamento do filtro passa baixa</b> .....	60
<b>4.7.2 Geração da FEM trapezoidal</b> .....	62
<b>4.7.3 Correção da potência reativa</b> .....	63
4.8 PROJETO DOS CONTROLADORES $PI_\alpha$ E $PI_\beta$ DE CORRENTE NO GERADOR .....	63

<b>4.8.1 Projeto dos controladores de potência reativa e tensão</b>	
$V_{cc}$ .....	69
4.9 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	69
<b>5 CONVERSOR DO LADO DA REDE .....</b>	<b>71</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	71
5.2 SISTEMA DE CCLR DA REDE ELÉTRICA .....	71
<b>5.2.1 Transformada de Park .....</b>	<b>72</b>
<b>5.2.2 Detecção digital de malha de fase .....</b>	<b>74</b>
<b>5.2.3 Equações em <math>dq</math> da rede elétrica .....</b>	<b>74</b>
<b>5.2.4 Potência de referência da rede no ponto de MPPT ..</b>	<b>76</b>
<b>5.2.5 Cálculo do filtro da rede .....</b>	<b>76</b>
<b>5.2.6 Projeto dos controladores discretos <math>PI_{Drd}</math> e <math>PI_{Drq}</math></b>	
<b>de corrente na rede .....</b>	<b>77</b>
5.3 AFUNDAMENTO SIMÉTRICO .....	77
5.4 DECOMPOSIÇÃO DE TENSÕES E CORRENTES ASSI-	
MÉTRICAS .....	78
5.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	81
<b>6 SIMULAÇÃO .....</b>	<b>83</b>
6.1 INTRODUÇÃO .....	83
6.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DO LADO DO GERADOR ..	83
6.3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DO LADO DA REDE .....	83
6.4 CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO EM REGIME NORMAL....	87
6.5 AFUNDAMENTOS SIMÉTRICOS .....	88
<b>6.5.1 Tensão e corrente nos terminais da rede.....</b>	<b>89</b>
<b>6.5.2 Controle do conversor do lado da rede .....</b>	<b>90</b>
<b>6.5.3 Tensão e corrente do lado do gerador .....</b>	<b>90</b>
<b>6.5.4 Controle do conversor do lado do gerador .....</b>	<b>92</b>
<b>6.5.5 Tensão <math>V_{cc}</math>, velocidade mecânica e potências .....</b>	<b>92</b>
6.6 AFUNDAMENTOS ASSIMÉTRICOS .....	93
<b>6.6.1 Tensão e corrente nos terminais da rede.....</b>	<b>94</b>
<b>6.6.2 Controle do conversor do lado da rede .....</b>	<b>94</b>
<b>6.6.3 Tensão <math>V_{cc}</math>, velocidade mecânica e potências .....</b>	<b>95</b>
<b>6.6.4 Tensão <math>V_{d+}</math> e <math>V_{d-}</math> .....</b>	<b>98</b>
6.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	98
<b>7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>101</b>
7.1 INTRODUÇÃO .....	101
7.2 OPERAÇÃO EM REGIME NORMAL .....	101
7.3 AFUNDAMENTO SIMÉTRICO .....	103
<b>7.3.1 Tensão e corrente nos terminais da rede.....</b>	<b>103</b>
<b>7.3.2 Controle do conversor do lado da rede .....</b>	<b>103</b>
<b>7.3.3 Tensão e corrente do lado do gerador .....</b>	<b>104</b>

<b>7.3.4 Controle do conversor do lado do gerador</b> .....	106
<b>7.4 AFUNDAMENTO ASSIMÉTRICO</b> .....	108
<b>7.4.1 Tensão e corrente nos terminais no afundamento: (0,2-0,5-0,7)pu</b> .....	110
<b>7.4.2 Controle do conversor do lado da rede no afundamento: (0,2-0,5-0,7)pu</b> .....	113
<b>7.4.3 Tensões de sequência positiva e negativa nos afundamentos</b> .....	115
<b>7.5 RENDIMENTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA</b> ...	116
<b>7.6 DIAGRAMA FINAL DE MONTAGEM DO CLG</b> .....	116
<b>7.7 DIAGRAMA FINAL DE MONTAGEM DO CLR</b> .....	119
<b>7.8 CONCLUSÃO GERAL</b> .....	119
<b>7.9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	121
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	123
<b>APÊNDICE A – Fotos da bancada</b> .....	129
<b>APÊNDICE B – Parâmetros do sistema</b> .....	135
<b>ANEXO A – Teorema de Fortescue</b> .....	139



# 1 INTRODUÇÃO GERAL

## 1.1 PRELIMINARES

A capacidade de energia eólica instalada no mundo cresceu 12,39% em 2013, passando de 283 GW para 318 GW (equivalente a quase 23 vezes a potência instalada de Itaipu, igual a 14 GW). Na Figura 1 pode-se acompanhar a evolução da capacidade global instalada de 1996 até 2012, conforme dados fornecidos pela *Global Wind Energy Council (GWEC)*.



Figura 1 – Capacidade eólica global instalada (1996 - 2012).

A energia proveniente dos ventos é ambientalmente correta, pois preserva a fauna e a flora do terreno onde está instalado o parque eólico, mantendo todas as atividades do entorno. Ao contrário de outras fontes, a energia eólica consome um recurso natural renovável, pois o vento é uma fonte inesgotável da natureza.

A energia eólica será capaz de garantir 10% das necessidades mundiais de eletricidade até 2020, criar 1,7 milhão de novos empregos e reduzir a emissão global de dióxido de carbono na atmosfera em mais de 10 milhões de toneladas.

Em 2013 a capacidade eólica brasileira instalada em seus 140 par-

ques alcançou 3,4 GW, registrando um crescimento de 73% em relação a 2011, segundo o balanço anual divulgado pela Associação Brasileira de Energia Eólica (Abeeólica) em (CERNE..., 2013).

O Brasil é o 13º no “*Ranking*” global de geração de energia eólica, em 2013, com 3,46 GW, sendo o 7º país que mais elevou a capacidade instalada em 2013. O país conta com uma carteira de novos projetos já contratados de mais de 7 GW a serem entregues até 2016. Essa cifra já coloca o Brasil entre os 10 maiores mercados para tecnologia de energia eólica do mundo.

O vento em algumas regiões do Brasil é forte e com bom índice de regularidade, o que situa o País como um dos mais favoráveis a investimento em parques eólicos no mundo, e nos beneficiam em termos de fator de capacidade e custos de geração, informações provenientes do Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) em (ANEEL..., 2003).

Nos próximos 8 anos, o mercado eólico brasileiro deve receber investimentos de R\$ 45 bilhões, segundo projeções feitas pela Revista Brasil Energia com base em dados da Abeeólica e do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2011), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética. A estimativa do PDE, que baliza o planejamento do setor elétrico brasileiro, é que a capacidade eólica instalada ultrapasse os 15,5 GW ao fim desse período.

O Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, sendo que a geração interna hidráulica responde por aproximadamente 65% da oferta, conforme pode ser verificado na Figura 2, segundo informações obtidas junto ao Banco de Informação da Geração da ANEEL (ANEEL..., 2015).

Diante desta realidade, com o aumento significativo da geração de energia eólica acoplado ao sistema elétrico, faz-se necessária a manutenção da energia elétrica mesmo frente a afundamentos de tensão da rede elétrica.

Os geradores síncronos a ímãs permanentes (GSIP) são amplamente usado em aplicações eólicas, já que a máquina síncrona com grande número de polos tem a vantagem de poder operar numa rotação compatível com os grandes aerogeradores enquanto que as máquinas assíncronas exigem a utilização de uma caixa multiplicadora de velocidade, popularmente conhecidas como *gearbox*, além de também operarem com velocidade variável. O GSIP pode apresentar força eletromotriz (FEM) senoidal ou trapezoidal. Como há algumas vantagens dos GSIP trapezoidais em relação aos senoidais, tais como: maior simplicidade, menor custo e maior densidade de potência, optou-se por este modelo neste trabalho (BOSE, 2002).

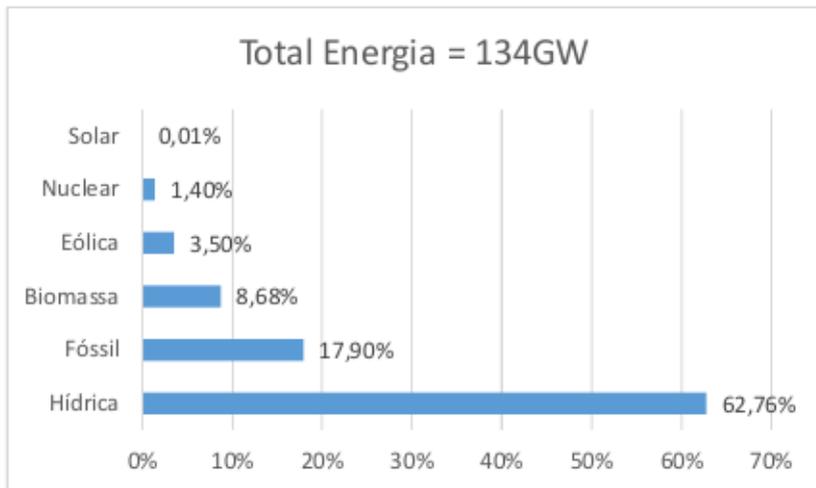


Figura 2 – Oferta interna de eletricidade no Brasil.

Uma configuração típica de um GSIP utilizado em energia eólica é ilustrado na Figura 3. O gerador síncrono é conectado à rede elétrica por dois conversores estáticos na configuração *back to back* composto de um conversor do lado do gerador (CLG) e outro conversor do lado da rede (CLR), interligados por um elo CC.

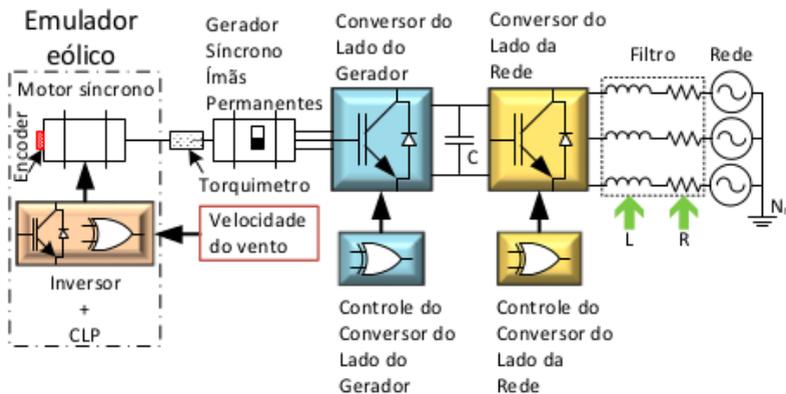


Figura 3 – Sistema completo geração eólica.

As técnicas de controle baseadas na transformação de Park, não são satisfatórias quando aplicadas em formas de ondas do tipo trapezoidal. Vários autores estudaram técnicas alternativas que fossem capazes de resolver este problema. Uma destas técnicas é conhecida como transformação “*pseudo-dq*” para motores de corrente contínua (CC) sem escovas, com FEM não senoidal, demonstrando eficiência quando comparado à técnica tradicional de controle dq, pois esta conseguiu minimizar o torque (GRENIER et al., 1995). Outra técnica, proposta por Lidozzi, é a de transformação “*Park-like*” (LIDOZZI et al., 2008). Contudo, estas técnicas de alguma forma fazem uso da transformação de Park.

Nesta tese optou-se pelo uso de um sistema baseado na teoria pq ou “*instantaneous active and reactive power theory*” desenvolvido por Akagi (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007). Propõe-se aqui uma técnica de controle pq original ao GSIP com FEM trapezoidal estimada.

O controle do conversor pelo lado do gerador (CCLG) é baseado, então, na teoria pq. Este controle também é responsável por manter constante a tensão do elo de corrente contínua (CC). O controle deste elo passa a ser mais eficiente quando feito do lado do gerador, conforme já proposto em (KIM et al., 2010). Nos primeiros estudos este controle era feito no lado da rede (CHINCHILLA; ARNALTES; BURGOS, 2006), mas neste caso numa condição de falha o sistema torna-se incapaz de manter constante a tensão do elo CC.

O controle do conversor do lado da rede (CCLR) faz uso da técnica convencional dq, pois neste caso a rede fornece tensões e correntes com forma de onda senoidal. Além disto, a rede opera possibilitando a passagem da maior quantidade de energia produzida pelo gerador em qualquer condição de vento, realizando o rastreamento do ponto de máxima potência (do inglês: *maximum power point tracking* – MPPT).

Simulações foram feitas utilizando o software *Matlab/Simulink* e os controles do sistema experimental foram efetuados utilizando um dSPACE 1104, um DSP da *Texas Instrument* TMS320F28335 e dois módulos inversores completos da Semikron, para a montagem do protótipo. Para emular a turbina eólica foi utilizado um inversor de frequência CFW11 com CLP incorporado, conectado a um motor *W-Magnet* da WEG de 15 kW. As fotos deste sistema implementado podem ser vistas no Apêndice A, nas Figuras 79 a 83.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema eólico de geração de energia elétrica utilizando um gerador síncrono de ímãs permanentes com uma FEM trapezoidal, que seja capaz de se manter conectado à rede de energia elétrica mesmo em condições de afundamento de tensão simétrico ou assimétrico produzindo o máximo de transferência de energia na condição normal de operação, ou seja, sem falhas do lado da rede.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Descrever e analisar matematicamente o modelo dinâmico do GSIP;
- Simular e implementar o controle do conversor do lado do gerador por meio da teoria  $pq$ , utilizando um protótipo de 3 kW;
- Simular e implementar o controle do conversor conectado à rede elétrica simétrica ou assimétrica por meio da teoria  $dq$ ;
- Simular e implementar estratégias de controle para maximizar a transferência de energia entre a turbina eólica e a rede de energia elétrica;
- Desenvolver, simular e implementar o controle do sistema diante de falhas simétricas ou assimétricas da rede elétrica.

## 1.3 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Desenvolver o controle de um sistema de energia eólica baseado em geradores síncronos a ímãs permanentes com FEM trapezoidal capaz de operar com eficiência e confiabilidade, garantindo níveis seguros de tensão e corrente nos diferentes circuitos do sistema, tanto em condições normais de operação como sob afundamentos de tensão da rede elétrica devido às falhas simétricas ou assimétricas.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO MANUSCRITO

Este manuscrito está organizado em 7 Capítulos, 2 Apêndice, 1 Anexo e a Referência. Os Capítulos 1 e 7 se referem a introdução e à

conclusão, respectivamente.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos relativos a qualidade de energia e as normas pertinentes ao assunto. Além disto, uma descrição da energia eólica, bem como equações pertinentes e relevantes para esta tese.

No Capítulo 3 as características de modelagem de uma máquina síncrona de ímãs permanente e o sistema de controle empregado.

No Capítulo 4 as características e também a modelagem da rede, e o controle da rede frente a afundamentos simétricos e assimétricos.

No Capítulo 5 simulação do sistema em condição nominal, bem como nos afundamentos simétricos e assimétricos.

No Capítulo 6 resultados experimentais obtidos nos ensaios e comentados, a conclusão geral do trabalho e proposta para futuros trabalhos.

## 1.5 LISTA DE TRABALHOS PUBLICADOS

Alguns dos resultados apresentados nesta tese foram publicados em anais de congressos. A seguir, a a lista destes trabalhos:

- i. IVANQUI, J.; VOLTOLINI, H.; GRANZA, M.H. and CARLSON, R. *Modeling and simulation of the Wind Turbine Emulator using induction motor driven by torque control inverter*. 10th IEEE/IAS International Conference on, 5-7 Nov. 2012. p. 1-6;
- ii. IVANQUI, J. and VOLTOLINI, H. and CARLSON, R. and WATANABE, E.H. *"pq Theory" Control Applied to Wind Turbine*. IEMDC, Chicago USA, 2013. p. 534-540;
- iii. BAZZO, T. and KOLZER, J. F. and IVANQUI, J. and MIRANDA, P. L. and CARLSON, R. *Modelagem de Gerador Síncrono a Ímãs Permanentes Conectado a um Retificador a Diodos*. Conference: MOMAG 2014, 31-03 Ago/Set 2014. p. 40-45;
- iv. IVANQUI, J.; VOLTOLINI, H.; CARLSON, R. *Control system for synchronous machines with permanent magnets in wind energy systems with voltage sags*. 10 th IEEE/IAS International conference on Industry applications, 2012;
- v. IVANQUI, J.; VOLTOLINI, H.; CARLSON, R. *Control of a wind turbine trapezoidal EMF PMSG under network asymmetrical faults*. Power Eletronics Conference (COBEP), Gramado, RS., 27-31 Oct 2013. p. 474-479.

## 1.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo orientou o leitor em reconhecer o problema, bem como eram os objetivos a serem atingidos. Uma visão geral de que maneira o manuscrito foi organizado e por fim, a lista de trabalhos publicados em congressos pertinentes a este trabalho.



## 2 QUALIDADE DE ENERGIA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo serão abordados os conceitos e as definições para a compreensão do afundamento de tensão, que é um dos parâmetros que caracterizam a qualidade de energia. Inicialmente são apresentadas algumas das principais normas sobre este assunto.

### 2.2 DEFINIÇÃO DE DISTÚRBIOS DE TENSÃO

Problemas de qualidade de energia ocorrem, devido a vários tipos de distúrbios elétricos. A maioria das perturbações na qualidade de energia elétrica depende da amplitude e/ou frequência da tensão da rede elétrica. Com base na duração das perturbações, estes eventos podem ser divididos em três tipos: de curta, média ou longa duração. Os distúrbios que causam a degradação da qualidade da energia provenientes de um sistema de energia e sua classificação são apresentados em síntese, na Tabela 1 (CHATTOPADHYAY S.AND MITRA; SENGUPTA, 2011).

Dentre as inúmeras definições de afundamentos de tensão, ou do termo em inglês *voltage sags*, (BOLLEN, 2000) pode-se dizer que são reduções de curta duração de seu valor eficaz causados por: curto-circuito, sobrecarga ou partida de grandes motores.

### 2.3 NORMAS SOBRE O AFUNDAMENTO DE TENSÃO

O IEEE, por meio da Norma IEEE Std. 1159 (1995) que trata da monitoração dos fenômenos de qualidade de energia, define afundamento de tensão como sendo a redução do valor RMS da tensão para um valor entre: 0,1 e 0,9 pu, durante o período compreendido entre: 0,5 e 30 ciclos (IEEE... , 1995).

Distúrbio	Definição
Interrupção	Intensidade da tensão é zero.
Subtensão	Intensidade da tensão é abaixo do seu valor nominal.
Sobretensão	Intensidade da tensão é acima do seu valor nominal.
Afundamento de tensão	A redução no valor eficaz de tensão é na faixa de 0,1 a 0,9 pu para uma duração maior do que 10 ms porém inferior a 1 s.
Elevação de tensão	O incremento no valor eficaz de tensão é na faixa de 1,1 a 1,8 pu para uma duração maior do que 10 ms porém inferior a 1 s.
Oscilação ( <i>flicker</i> )	Efeito visual da variação na frequência da tensão de um sistema.
Tensão ou corrente desbalanceada	Variação na intensidade da tensão ou corrente em qualquer uma ou duas das três fases.
Transientes	Aumento repentino no sinal.
Harmônicas	Formas de ondas não senoidais.

Tabela 1 – Definição de distúrbios no sistema de potência.

## 2.4 VALORES CARACTERÍSTICOS DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Os afundamentos de tensão são gerados no sistema elétrico por: partida de motores de grande porte, energização de transformadores e ocorrência de curtos-circuitos na rede elétrica. Entre os problemas originados por afundamentos de tensão, pode-se destacar por exemplo, os produzidos em cargas industriais sensíveis, como os equipamentos que possuem dispositivos microprocessados.

Na Figura 4 pode-se observar uma síntese das principais normas de alguns países, adaptado de (IOV et al., 2007) quanto ao afundamento de tensão permitido em valores percentuais de tensão em função do tempo de ocorrência da falha.

O operador nacional do sistema (ONS), no submódulo 3.8, Capítulo 8, estabelece os requisitos técnicos mínimos para conexão de geradores eólicos à rede. Caso haja afundamento de tensão em uma ou mais fases no ponto de conexão com a rede básica da central de geração eólica, a central deve continuar operando se a tensão nos seus terminais permanecer acima da curva indicada na Figura 5 (ONS..., 2009).

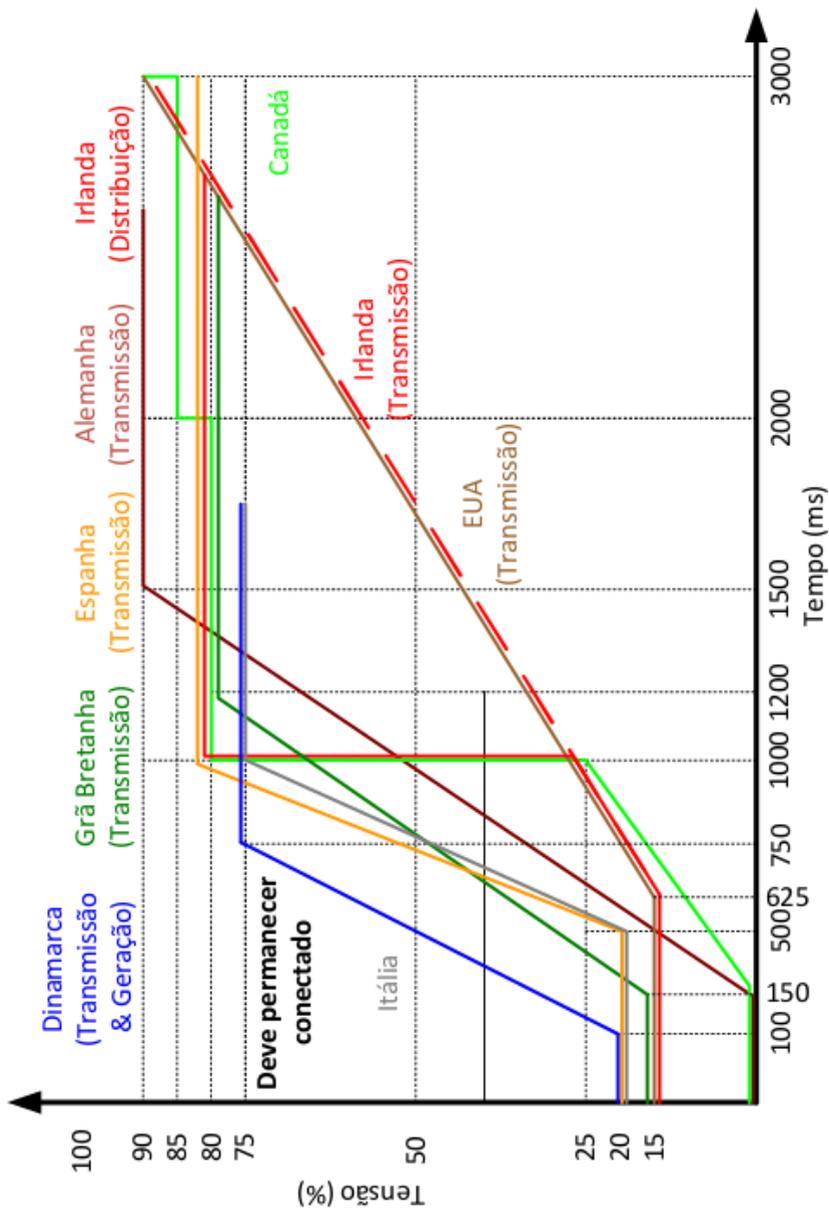


Figura 4 – Normas das principais concessionárias de alguns países.

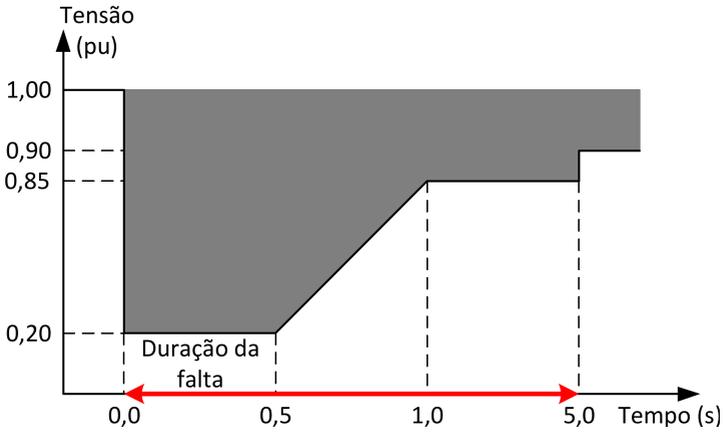


Figura 5 – Norma Brasil.

## 2.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste Capítulo, dentre os quesitos de interesse relevante em relação a qualidade da energia elétrica, apresentou as normas que caracterizam e dimensionam o que é considerado e permitido para um afundamento de tensão.

### 3 SISTEMAS DE ENERGIA EÓLICA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Este Capítulo apresenta as principais características para o modelamento das turbinas eólicas, identificando o ponto de máxima extração de potência das turbinas e o modelo emulado na bancada de uma turbina eólica.

#### 3.2 PRINCÍPIOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA

##### 3.2.1 Potência de uma turbina eólica

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão de energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o uso de turbinas eólicas, para a geração de eletricidade ou para trabalhos mecânicos tal como por exemplo, o bombeamento de água.

O modelo aerodinâmico permite calcular o valor do conjugado mecânico (ou da potência mecânica) aplicado ao eixo do gerador elétrico, considerando diferentes tipos de turbinas eólicas a ser representado (eixo vertical ou horizontal, número de pás e controle de ângulo, entre outros fatores). No entanto o modelo aerodinâmico independe do tipo de gerador elétrico escolhido ou do tipo de controle utilizados nos conversores.

A equação 3.1 é a relação linear entre a velocidade tangencial de ponta de pá e a velocidade de vento que tipicamente é conhecido como *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ).

$$\lambda = \frac{\omega_T R}{V_v} \quad (3.1)$$

em que:

$\omega_T$ : Velocidade angular da turbina (rad/s);

R: Raio da turbina (m);

$V_v$ : Velocidade do vento (m/s).

O conjugado mecânico é dado pela equação:

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A C_p (\lambda, \beta) V_v^2 \quad (3.2)$$

em que:

- $T_m$ : Conjugado mecânico (Nm);
- $\rho$ : Densidade do ar ( $Kg/m^3$ );
- A: Área varrida pelas pás da turbina ( $m^2$ );
- $C_p(\lambda, \beta)$ : Coeficiente de potência ( $-$ )<sup>1</sup>;
- $\beta$ : Ângulo de passo da turbina ( $^\circ$ ).

A partir da relação entre conjugado e velocidade, obtém-se a potência mecânica em watt (W), dada pela equação:

$$P_m = \omega_T T_m \quad (3.3)$$

Por consequência determina-se a potência extraída do vento por meio da equação:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_v^3 \quad (3.4)$$

O coeficiente de potência indica o rendimento com que a turbina eólica transforma energia cinética contida nos ventos em energia cinética de rotação. Como foi publicado em 1919 pelo físico alemão Albert Betz, o valor máximo possível deste coeficiente é de 0,59. Este limite estabelece que a máxima potência extraída por uma turbina eólica é de 59,3% da energia total de uma coluna de ar que atravessa a área varrida pelas pás. O coeficiente de potência depende do ângulo de passo das pás ( $\beta$ ) e da relação linear de velocidade ( $\lambda$ ). Do modelo sugerido por Heier (HEIER, 1998), o coeficiente de potência é dado pelas equações:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3.5)$$

$$\lambda_i^{-1} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3.6)$$

Estes valores são apresentados na Tabela 2, extraídos de (VOLTOLINI, 2007), para uma turbina do tipo vertical com 3 pás de 2 metros de raio.

As curvas de  $C_p$  mostradas na Figura 6 são implementadas em ambiente de simulação do *Matlab/Simulink* com o modelo definido pelas equações (3.5) e (3.6), e os parâmetros da Tabela 2. É mostrado na Figura 6 o comportamento de  $C_p$  em função de  $\lambda$  para os valores de  $\beta$

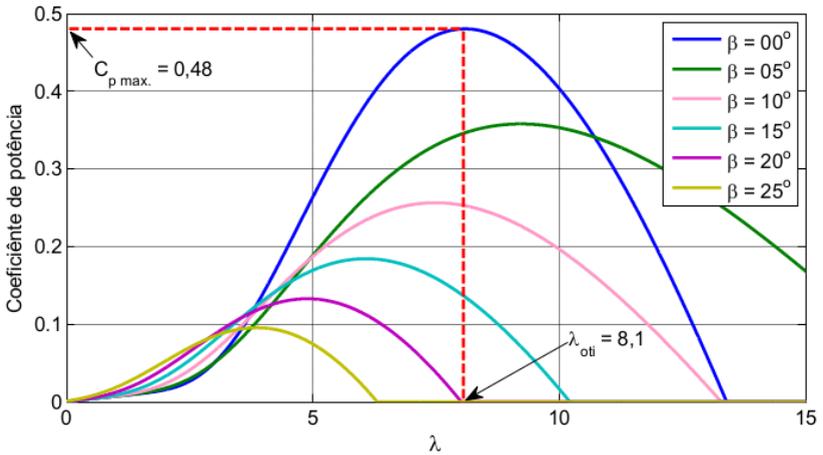
---

<sup>1</sup>Adimensional

$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$
0,5176	116	0,4	5	21	0,0068	0,08	0,035

Tabela 2 – Coeficientes.

entre  $0^\circ$  e  $25^\circ$  inclusive. Nesta figura ainda pode se observar o valor máximo que  $C_p$  ( $C_{pmax.} = 0,48$ ) pode atingir, quando tem-se o  $\lambda_{oti}$  de 8,1.

Figura 6 – Comportamento de  $C_p$  em função de  $\lambda$  e  $\beta$ .

### 3.2.2 Rastreamento do ponto de maior potência

Pode-se determinar uma relação ótima entre a velocidade de operação de uma turbina eólica e a velocidade do vento a fim de que seja extraída a potência máxima da turbina.

A Figura 7 foi simulada a partir da equação 3.4 em que a potência mecânica é dada em função da rotação no eixo da turbina, para diferentes valores da velocidade de vento.

A partir das equações 3.1 a 3.6, é apresentada na mesma figura a trajetória do ponto de máxima potência, também conhecido como MPPT, do termo em inglês: *Maximum Power Point Tracking*.

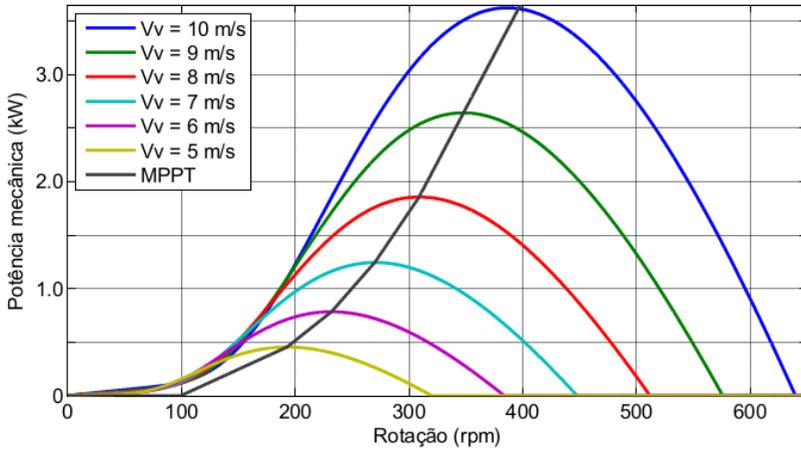


Figura 7 – Comportamento de  $C_p$  para  $\beta = 0$  em várias velocidades e rastreamento MPPT.

### 3.3 MODELO IMPLEMENTADO DE TURBINA EÓLICA

Para que se pudesse emular uma turbina eólica foi construído um sistema composto de um inversor de frequência incorporado com um PLC (CFW-11, da WEG), onde foram implementadas as equações que descrevem o modelo da turbina. A medição de torque é realizada por um torquímetro (T20WN, da HBM). Este inversor alimenta um motor de ímãs permanentes (W-Magnet, da WEG), que tem acoplado ao seu eixo um *encoder* relativo que determina a velocidade mecânica do eixo do motor. Além disto, pode-se fazer a variação da velocidade do vento por meio do *software* do PLC *online* com o computador, ou por meio de um potenciômetro ligado a entrada A/D do CFW-11, neste caso dispensando a conexão com computador. Entre o motor e o gerador (GSIP, da ZM Bombas), faz-se necessária a redução de velocidade. Para isto foi acoplada uma caixa multiplicadora de velocidade, com uma relação de 7,2:1, produzido pela empresa Macopema (H20). O diagrama do sistema implementado é apresentado na Figura 8.

Nas figuras 79 e 80 é possível ver as fotos do sistema implementado fisicamente.

O *W-Magnet* acoplado ao inversor, ligado à rede em 380 V, possui uma limitação máxima de rotação fornecida pelo catálogo de 2425 rpm, razão pelo qual, no lado do *gearbox* de baixa rotação aco-

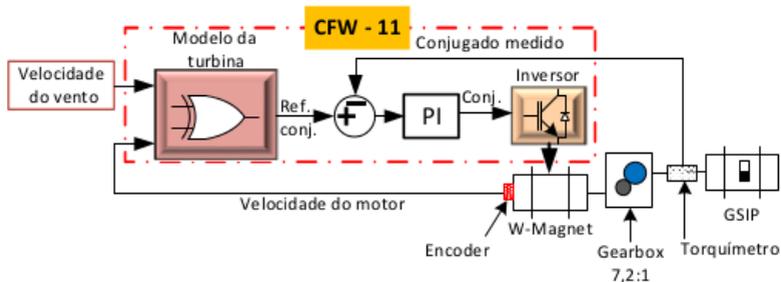


Figura 8 – Modelo do simulador da turbina eólica.

plado ao GSIP, tem-se uma velocidade máxima de 336,8 rpm. A Figura 9 é redesenhada com intuito de apresentar os pontos de operação máxima e o ponto onde se obteria a potência mecânica de 3 kW no eixo do gerador.

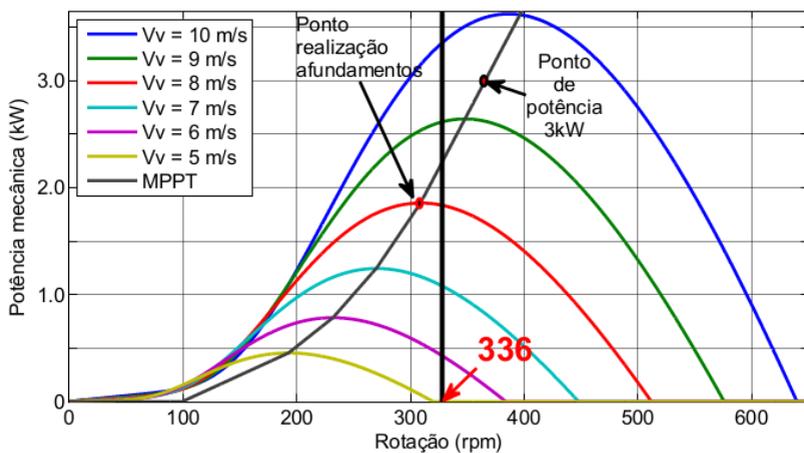


Figura 9 – Valores limites.

### 3.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo situou o leitor, principalmente, nas condições das turbinas eólicas. Além de mostrar algumas limitações inerentes do sistema implementado.



## 4 CONVERTOR DO LADO DO GERADOR

### 4.1 INTRODUÇÃO

Nesta seção serão abordados os conceitos que envolvem a máquina síncrona de ímãs permanentes, força eletromotriz (FEM) trapezoidal, a teoria  $pq$ , o sistema de controle, e o controle vetorial aplicados nesta tese.

### 4.2 GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES

O GSIP é uma máquina trifásica de corrente alternada excitada por ímãs permanentes que fornecem um fluxo constante, tendo seu modelo apresentado na Figura 10. Como toda a máquina síncrona, a frequência elétrica gerada depende do número de polos e da velocidade da rotação.

O GSIP apresenta várias vantagens em relação aos geradores de indução em aproveitamentos de energia eólica. Pode prover alta eficiência e confiabilidade na geração de energia elétrica, visto que não há a necessidade de excitação externa e não há perdas no cobre do rotor, além disso, elimina o *gearbox*, que representa 19,4% dos problemas de manutenção dos aerogeradores eólicos baseados em geradores de indução (GONG; YANG; QIAO, 2010).

O gerador utilizado neste trabalho é um gerador síncrono com ímãs superficiais sem enrolamentos amortecedores, o que significa que a indutância tem o mesmo valor no eixo direto e no eixo em quadratura.

A FEM deste gerador é do tipo não senoidal, e far-se-á suas deduções aproximando para uma máquina com uma FEM trapezoidal.

### 4.3 MODELAGEM DO GSIP

A equação do fluxo total do estator para um gerador síncrono de ímãs permanentes com fluxo trapezoidal, conforme (GRENIER et al., 1995), a partir da Figura 10 é dado por:

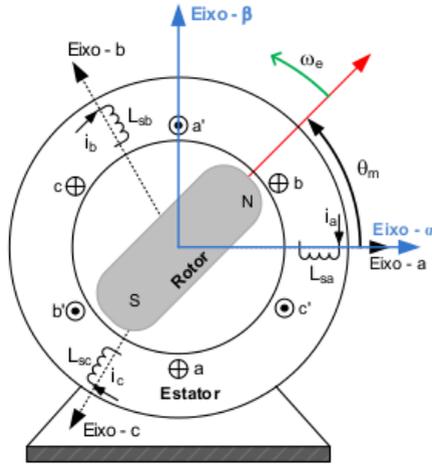


Figura 10 – Modelo do gerador síncrono de ímãs permanentes

$$\begin{bmatrix} \lambda_{t_{sa}} \\ \lambda_{t_{sb}} \\ \lambda_{t_{sc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

em que:

$\lambda_{t_{sa}}, \lambda_{t_{sb}}$  e  $\lambda_{t_{sc}}$ : Fluxo magnético total concatenado pelas fases a, b e c do estator (Wb);

$\lambda_{sa}, \lambda_{sb}$  e  $\lambda_{sc}$ : Fluxo magnético concatenado pelas fases a, b e c do estator, produzido somente pelos enrolamentos do estator (Wb);

$\lambda_{ra}, \lambda_{rb}$  e  $\lambda_{rc}$ : Fluxo magnético total concatenado pelas fases a, b e c do estator, produzido somente pelos ímãs do rotor (Wb).

A equação que descreve as tensões no estator nos eixos de referência abc pode ser escrito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{t_{sa}} \\ \lambda_{t_{sb}} \\ \lambda_{t_{sc}} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

em que:

$R_s$ : Resistência de uma fase do estator ( $\Omega$ );

$v_{ga}, v_{gb}$  e  $v_{gc}$ : Tensões aplicadas às fases A, B e C do estator (V);

$i_{ga}, i_{gb}$  e  $i_{gc}$ : Correntes nas fases A, B e C do estator (A).

Substituindo a equação 4.1 na equação 4.2, a equação de tensão pode ser reescrita:

$$\begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} \right\} \quad (4.3)$$

Escrevendo o fluxo magnético produzido pelo estator, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Mas como  $\mathbf{L}$ , pode ser escrito como:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_s & M_s \\ M_s & L_{sb} & M_s \\ M_s & M_s & L_{sc} \end{bmatrix}$$

em que:

$L$ : Matriz de indutâncias do estator (H);

$L_{sa}, L_{sb}, L_{sc}$ : Indutância de uma fase do estator (H);

$M_s$ : Indutância mútua entre duas fases do estator (H).

Então 4.4, é reescrito como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sa} \\ \lambda_{sb} \\ \lambda_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Desta forma a equação elétrica da máquina é escrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \mathbf{L} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Quanto aos fluxos magnéticos produzidos pelo rotor e concatenados pelo estator, pode-se escrever:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{ga} \\ e_{gb} \\ e_{gc} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

em que:

$e_{ga}$ ,  $e_{gb}$  e  $e_{gc}$ : Tensões induzidas nas fases A, B e C do estator devido ao movimento do rotor e ao campo gerado pelos ímãs do rotor (V).

E substituindo a 4.7 em 4.6 resulta em:

A Figura 11 é modelada da equação 4.8. Este é o circuito elétrico equivalente da máquina síncrona de ímãs permanentes nos eixos A, B e C.

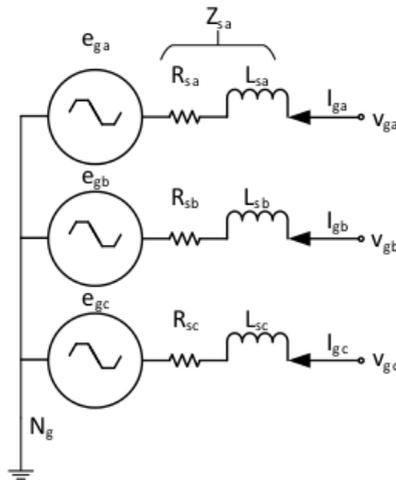


Figura 11 – Circuito equivalente trifásico do MSIP.

$$\begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \mathbf{L} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ga} \\ e_{gb} \\ e_{gc} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Ainda a equação 4.7, pode ser escrita em função da posição do rotor, como:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} = \omega_m \frac{d}{d\theta_m} \begin{bmatrix} \lambda_{ra} \\ \lambda_{rb} \\ \lambda_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

em que:

$\omega_m$ : Velocidade angular mecânica do rotor (rad/s);

$\theta_m$ : Posição mecânica do rotor (rad).

Da equação 4.9 os termos:  $d\lambda_{ra}/dt$ ,  $d\lambda_{rb}/dt$  e  $d\lambda_{rc}/dt$  dependem da posição do rotor ( $\theta_m$ ) e não variam com a velocidade, desde que a máquina esteja operando na região linear, ou seja, fora da região de saturação.

### 4.3.1 Transformada de Clarke

A transformação de Clarke ou transformação  $\alpha\beta$  é um conjunto de equações matemáticas que simplificam a análise de sistemas trifásicos. Esta transformação converte um sistema trifásico abc em um sistema bifásico  $\alpha\beta$  ortogonal e uma componente de sequência zero. A Figura 12 mostra a relação de transformação de coordenadas abc e  $\alpha\beta$ . Assim, o eixo  $\alpha$  fica alinhado com o eixo **a**, enquanto o eixo  $\beta$  é ortogonal a  $\alpha$ . Far-se-á o uso deste fator  $\sqrt{2/3}$  na multiplicação pela matriz de transformação para tornar o resultado invariante em potência.

$$T_{[abc \rightarrow \alpha\beta 0]} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Transformada inversa de Clarke.

$$T_{[\alpha\beta 0 \rightarrow abc]} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Como o GSIP, aqui utilizado é composto de três fios então as equações 4.10 e 4.11 podem ser simplificadas para:

$$T_{[abc \rightarrow \alpha\beta]} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

e

$$T_{[\alpha\beta \rightarrow abc]} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Aplicando a transformada de Clarke na equação 4.8, tem-se:

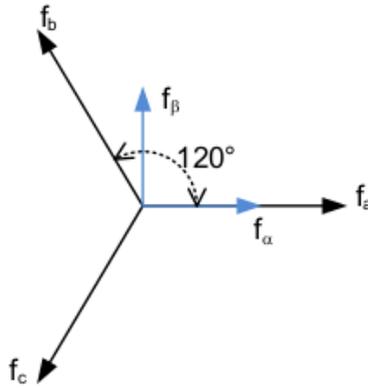


Figura 12 – Transformada de Clarke.

$$v_{g0} = R_s i_{g0} + (L + 2M) \frac{di_{g0}}{dt} + e_{g0} \quad (4.14)$$

$$v_{g\alpha} = R_s i_{g\alpha} + (L - M) \frac{di_{g\alpha}}{dt} + e_{g\alpha} \quad (4.15)$$

$$v_{g\beta} = R_s i_{g\beta} + (L - M) \frac{di_{g\beta}}{dt} + e_{g\beta} \quad (4.16)$$

Grenier afirma que para formas de ondas não senoidais a componente de sequência zero pode ou não ser nula, porém como verificado em simulação e de forma experimental, o resultado desta componente de sequência zero foi nula. Assim, simplifica-se apenas para as componentes  $\alpha$  e  $\beta$  da tensão (GRENIER et al., 1995).

Aplicando a transformada de Laplace em 4.15 e 4.16, tem-se:

$$V_{g\alpha}(s) = E_{g\alpha}(s) + I_{g\alpha}(s)(R_s + sL_{gs}) \quad (4.17)$$

$$V_{g\beta}(s) = E_{g\beta}(s) + I_{g\beta}(s)(R_s + sL_{gs}) \quad (4.18)$$

em que:  $L_{gs} = L - M$ .

Reescrevendo as equações 4.17 e 4.18 em função da corrente, tem-se:

$$I_{g\alpha}(s) = \frac{V_{g\alpha}(s) - E_{g\alpha}(s)}{(R_s + sL_{gs})} \quad (4.19)$$

$$I_{g\beta}(s) = \frac{V_{g\beta}(s) - E_{g\beta}(s)}{(R_s + sL_{gs})} \quad (4.20)$$

A equação de equilíbrio de torque é dado por:

$$T_e = J \left( \frac{2}{N_{pp}} \right) \frac{d\omega_{ge}}{dt} + B_m \left( \frac{2}{N_{pp}} \right) \omega_{ge} + T_L \quad (4.21)$$

em que:

- $J$ : Momento de inércia ( $kg^2.m$ );
- $N_{pp}$ : Número de pares de polos (-);
- $\omega_{ge}$ : Velocidade angular elétrica do gerador ( $rad/s$ );
- $B_m$ : Coeficiente de atrito ( $N.m.s$ );
- $T_L$ : Conjugado de carga ( $N.m$ );
- $T_e$ : Conjugado eletromagnético ( $N.m$ ).

#### 4.4 TEORIA PQ

A “teoria  $pq$ ” é baseada na potência instantânea ativa e reativa no domínio do tempo. Não há restrições nas formas de ondas da tensão e da corrente, e pode ser aplicada a sistema trifásicos com ou sem neutro. Além disto, é valida tanto na condição de transitório quanto em regime permanente (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

A “teoria  $pq$ ” usa a transformação  $\alpha\beta 0$ , também conhecida como transformada de Clarke (WATANABE; STEPHAN; AREDES, 1993), que consiste de uma matriz de termos reais para transformar um sistema trifásico (abc) de tensão e corrente para um eixo de referência estacionário ( $\alpha\beta 0$ ), conforme visto na equação 4.10.

Não há corrente de sequência zero num sistema trifásico a três fios, como é o caso do GSIIP aqui utilizado.

Os vetores de tensão e corrente instantâneas podem ser definidos como:

$$\mathbf{e} = v_\alpha + jv_\beta \quad (4.22)$$

$$\mathbf{i} = i_\alpha + ji_\beta \quad (4.23)$$

Desta maneira, pode se calcular a potência instantânea, dada por:

$$\begin{aligned} \mathbf{S} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{i}^* &= (v_\alpha + jv_\beta) (i_\alpha - ji_\beta) \\ &= \underbrace{(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta)}_p + j \underbrace{(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta)}_q \end{aligned} \quad (4.24)$$

em que:

\*: representa o conjugado complexo da corrente.

A equação 4.24 pode ser escrita de forma matricial, como:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

A equação 4.25 pode ser trabalhada de forma a obter-se seu valor em função da corrente, dado por:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

#### 4.5 MODULAÇÃO VETORIAL POR LARGURA DE PULSO

O controle dos inversores de frequência utiliza a técnica da Modulação Vetorial por Largura de Pulso, ou do seu termo em inglês *Space Vector Pulse Width Modulation* (SV-PWM), cujo modelamento foi extraído de (BOSE, 2002).

Para o conversor o controle manterá o vetor de referência inscrito no hexágono conforme apresentado na Figura 13, o que resulta em um índice de modulação maior que 0 e menor que 0,907. Para uma tensão de referência de raio inscrito no círculo limite é o módulo da tensão de fase aplicada pelo conversor, que pode ser definido como o ganho máximo do conversor na região linear de operação, é dado por:

$$\vec{V}_m = \frac{2}{3} V_{cc} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = 0,577V_{cc} \quad (4.27)$$

em que:

$V_m$ : Módulo da tensão de fase máxima aplicada (V);

$V_{cc}$ : Tensão contínua no elo CC (V).

#### 4.6 DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA EÓLICO

Conforme pode ser observado na Figura 14, o modelo de geração de energia eólica é composto de uma turbina eólica, um GSIP e dois conversores estáticos na configuração *back to back* interligados por um elo CC e conectado à rede elétrica.

Durante o afundamento de tensão não é conveniente continuar

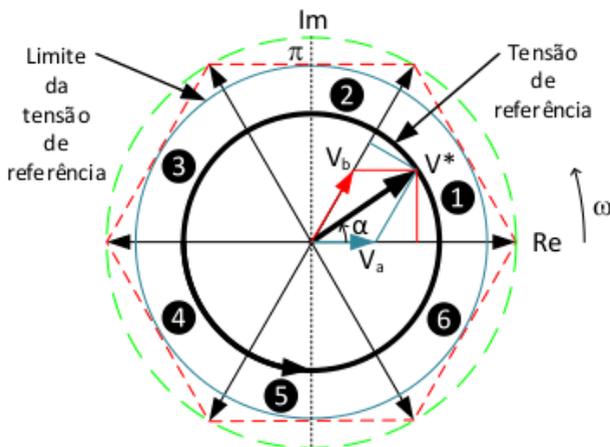


Figura 13 – Modulação linear do SV-PWM

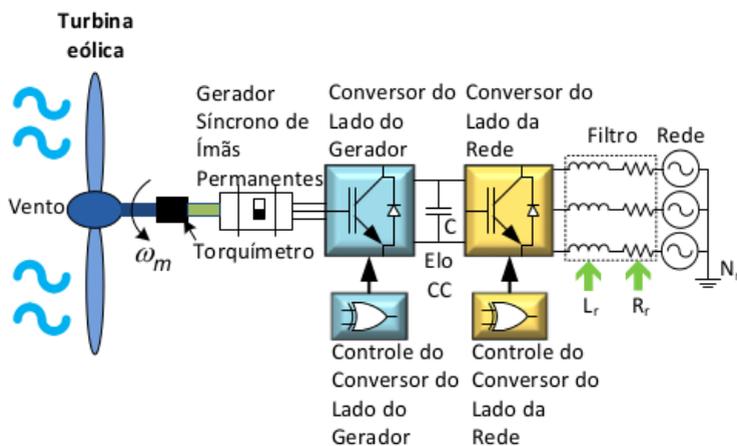


Figura 14 – Modelo completo de geração de energia eólica.

transferindo toda a energia produzida pelo gerador à rede, pois durante este evento, a corrente do conversor do lado da rede atinge valores normalmente maiores que a capacidade deste conversor e consequentemente comprometendo a integridade física dos componentes.

Por outro lado, se a potência na rede diminui e a potência ge-

rada permanecer constante, isto implica num crescimento excessivo da tensão no elo CC. Além disso, o CLR nestas condições é incapaz de controlar esta tensão. Por esta razão, o CLG será responsável pelo controle vetorial do GSIP além de ter como principal objetivo manter a tensão constante no elo CC em qualquer condição de operação.

O controle vetorial do conversor do lado da rede (CCLR) será então responsável pela geração da potência ativa e reativa injetada na rede. Em condições normais de operação ele garante o rastreamento do ponto de máxima potência da turbina eólica em função das condições de velocidade de vento.

## 4.7 CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DO GERADOR

Destacando que o principal objetivo do controle deste conversor é manter a tensão no elo CC constante, é necessário ajustar a potência gerada pelo GSIP à potência entregue à rede elétrica, caso contrário a tensão no elo CC poderá aumentar excessivamente sob condições de falhas (KIM et al., 2010) e (KIM et al., 2012), conforme já proposto nos primeiros estudos por (CHINCHILLA; ARNALTES; BURGOS, 2006).

O controle vetorial deste conversor mostrado na Figura 15 é realizado através do controle das correntes do gerador sendo imposta pela referência de potência  $p$  e  $q$ , baseado na teoria PQ, conforme proposto em (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007).

A Figura 16 mostra a forma de onda da tensão nos terminais do gerador adquirida por meio de um filtro passa baixa (FPB) com frequência de corte de  $2,1 \text{ kHz}$ . Observando esta figura pode-se concluir que é impossível usa-lo como referência de tensão para a aplicação da teoria  $pq$  no CLG.

Desta forma, foi reconstruída a FEM a partir da velocidade e da posição do eixo do gerador e, inicialmente, sincronizando com o mesmo a vazio reproduzindo a FEM trapezoidal.

### 4.7.1 Dimensionamento do filtro passa baixa

O módulo do inversor do CCLG opera numa frequência máxima de  $20 \text{ kHz}$ , porém nesta frequência a uma geração de ruído inconveniente ao ouvido humano, por esta razão optou-se em chavear numa frequência de  $10 \text{ kHz}$ . Porém para que se possa medir a tensão de saída do gerador, já que esta proveniente do chaveamento do conversor, fez-se

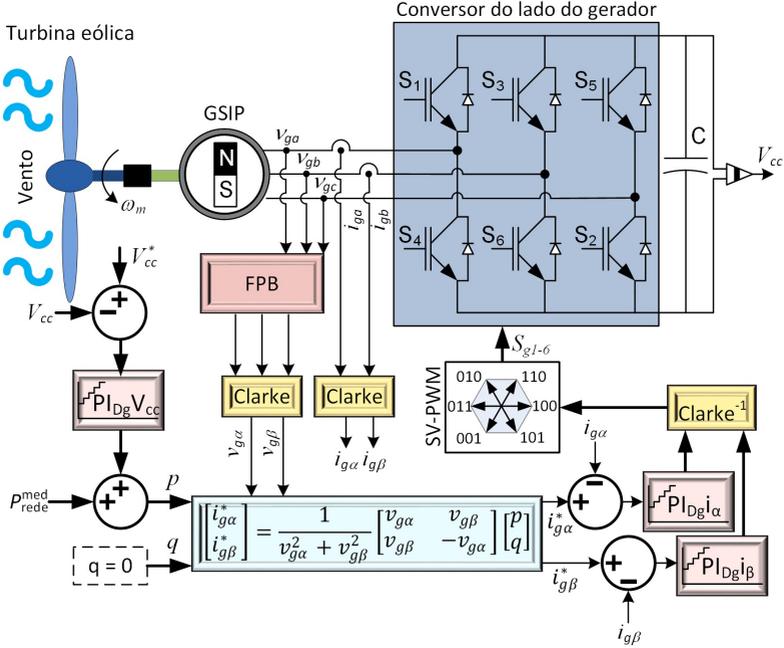


Figura 15 – Diagrama de bloco do CCLG

uso de um filtro de primeira ordem, consistindo de um circuito passivo RC, conforme frequência calculada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_f \cdot C_f} \quad (4.28)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 335 \cdot 10^3 \cdot 220 \cdot 10^{-12}} = 2,14 \text{ kHz} \quad (4.29)$$

Desta forma com uma frequência de corte bem abaixo da frequência de operação do conversor, e por outro lado, registrando a forma de onda do gerador que opera numa frequência máxima de 35 Hz.

em que:

$R_f$ : Resistência do filtro passa baixa;

$C_f$ : Capacitor do filtro passa baixa.

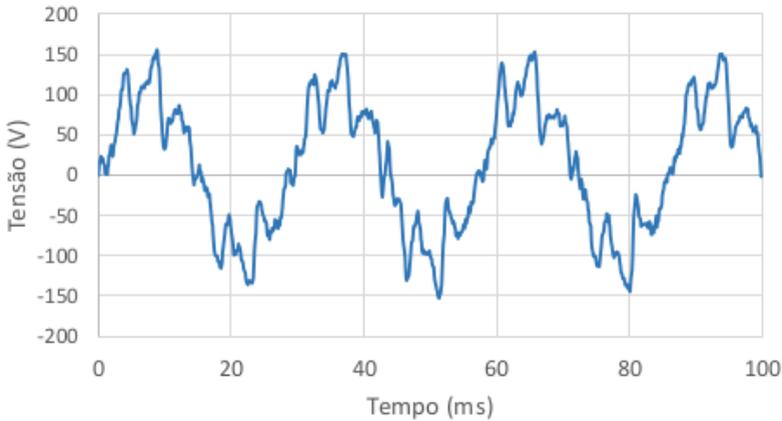


Figura 16 – Tensão lida em uma fase com 100% de carga.

#### 4.7.2 Geração da FEM trapezoidal

A partir da equação 4.30 e com a posição do rotor ( $\theta_m$ ) é calculada a FEM, ilustrada na Figura 17, sendo mostrado as duas formas de ondas trapezoidais geradas, com defasagem de  $120^\circ$  entre si.

Intervalo	Equação
$0 < \theta_m \leq \alpha$	$e(\theta_m) = K * \theta_m$
$\alpha < \theta_m \leq (180^\circ - \alpha)$	$e(\theta_m) = Max.$
$(180^\circ - \alpha) < \theta_m \leq (180^\circ + \alpha)$	$e(\theta_m) = K * (180^\circ - \theta_m)$
$(180^\circ + \alpha) < \theta_m \leq (360^\circ - \alpha)$	$e(\theta_m) = Min.$
$(360^\circ - \alpha) < \theta_m \leq 360^\circ$	$e(\theta_m) = K * (\theta_m - 360^\circ)$

em que:

$$K = Max./\alpha.$$

O ângulo  $\alpha$  é  $60^\circ$ , obtido a partir de ensaios no gerador. O valor da tensão de pico (MAX) depende apenas de  $\omega_m$ , conforme equação 4.9, e obedecendo a relação:

$$MAX = 4.f_g \quad (4.31)$$

em que:

$f_g$  é a frequência da tensão do gerador em Hertz (Hz).

Esta relação foi obtida de forma experimental.

O *encoder* utilizado é do tipo absoluto, o ângulo  $\theta_m$  é sincronizado com a tensão  $v_{ga}$  do gerador antes do controle de corrente ser ativado.

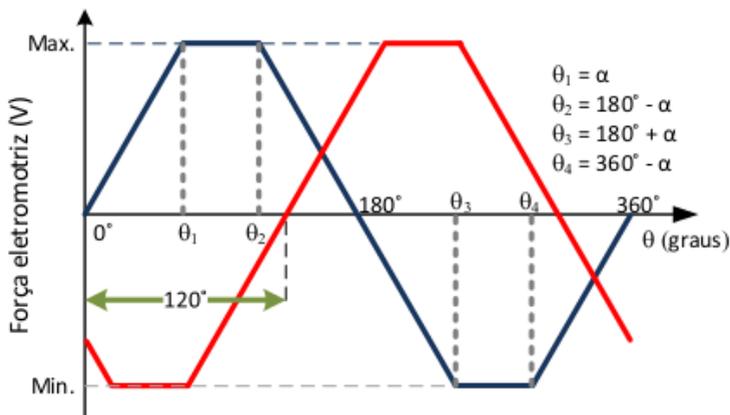


Figura 17 – FEM trapezoidal

### 4.7.3 Correção da potência reativa

Conforme (GRAUERS, 1996) as correntes do gerador ( $I_{ga}$ ,  $I_{gb}$ ,  $I_{gc}$ ) e as tensões nas fases ( $v_{ga}$ ,  $v_{gb}$ ,  $v_{gc}$ ) são usados para manter o limite de potência do gerador, e controlando-se o ângulo de fase entre correntes e tensões, diferentes valores de potência ativa e reativa são fornecidas pelo gerador. Contudo para maximizar a potência ativa, o fator de potência deve se aproximar o máximo da unidade.

Através da teoria  $pq$ , o CLG pode operar com FP unitário se o valor de  $q$  na equação 4.26 for mantido em zero. A Figura 15 mostra a implementação desta estratégia no controle do CLG.

## 4.8 PROJETO DOS CONTROLADORES $PI_\alpha$ E $PI_\beta$ DE CORRENTE NO GERADOR

Com a FEM trapezoidal imposta, aparece uma potência reativa no gerador a medida que a carga vai sendo incrementada. Afim de tornar esta potência nula, mais um controlador proporcional integral

(PI) foi acrescentado à malha, forçando com que o valor da potência reativa seja nulo no gerador.

O sistema completo é apresentado na Figura 18.

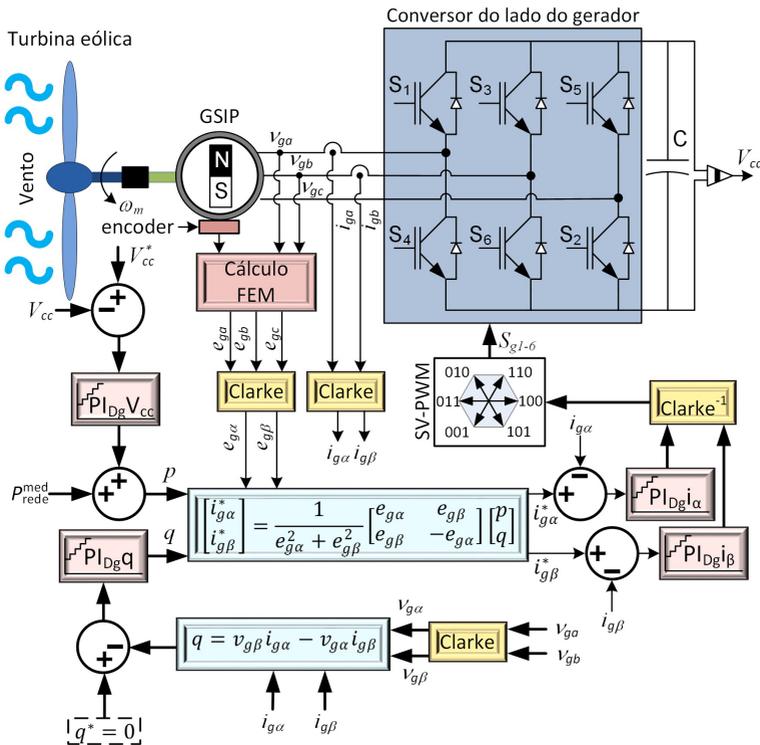


Figura 18 – Diagrama de bloco completo do lado do gerador.

Este sistema é composto de quatro malhas de controle que são dimensionadas de acordo com o método do lugar das raízes (OGATA, 1982), sendo: uma de potência, uma de tensão e outras duas de corrente. A potência tem como referência a potência medida da rede elétrica que é realimentada  $P_{rede}^{med}$ .

O projeto dos controladores  $PI_{\alpha}$  e  $PI_{\beta}$  discretos das malhas de controle de corrente no estator será realizado baseado no modelo vetorial do GSIP apresentado na Seção 4.3 deste Capítulo.

As funções de transferência da planta das malhas de controle de corrente  $i_{\alpha}$  e  $i_{\beta}$  são idênticas. A seguir será apresentado o projeto do controlador de corrente  $i_{\alpha}$ . Entretanto, o mesmo procedimento é válido para o caso da malha de corrente  $i_{\beta}$ .

Aplicando a transformada de Laplace ao modelo do GSIP apresentado na Figura 19, faz-se:

$$GSIP = \frac{1}{L_{sa}s + R_{sa}} \quad (4.32)$$

em que:

$R_{sa}$ : resistência interna do gerador na fase A ( $\Omega$ );

$L_{sa}$ : indutância interna do gerador na fase A ( $H$ ).

Dos valores de resistência e indutância, define-se a constante de tempo ( $\tau$ ), dada por:

$$\tau = \frac{L_{sa}}{R_{sa}}$$

O ganho dos  $PI_\alpha$  e  $PI_\beta$ , dependem dos valores da constante proporcional ( $K_p$ ) e da constante integral ( $K_i$ ), que é dado por:

$$PI_\alpha = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p(s + \frac{K_i}{K_p})}{s} \quad (4.33)$$

Ou:

$$\frac{K_p(s + Z_c)}{s} \quad (4.34)$$

O tempo de integral, é definido como sendo:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} = \frac{1}{Z_c} \quad (4.35)$$

O ganho do conversor é dado por:

$$A_c = \frac{V_{cc}}{\sqrt{3}} \quad (4.36)$$

em que:

$A_c$  é o ganho do conversor SV-PWM.

A função de transferência da planta ( $G_p$ ), dado pelo produto de 4.32 e 4.36, é

$$G_p(s) = A_c \frac{1}{s + \tau^{-1}} \quad (4.37)$$

A função de transferência de malha aberta ( $G_0(s)$ ), fornecido pelo produto entre 4.33 e 4.37, é dado por:

$$G_0(s) = A_c \frac{\frac{1}{L_{sa}}}{s + \tau^{-1}} K_p \frac{s + T_i^{-1}}{s} \quad (4.38)$$

Conforme dados do gerador, descritos no apêndice B:

$$\begin{aligned} R_{sa} &= 600m\Omega \\ L_{sa} &= 17,6mH \end{aligned}$$

logo:

$$\tau = \frac{17,6 \cdot 10^{-3}}{600 \cdot 10^{-3}} = 29,3ms$$

O ganho do conversor SV-PWM é:

$$A_c = v_{ga} = \frac{V_{cc}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,9V \quad (4.39)$$

E a equação da planta, é dada por:

$$G_p(s) = 230,9 \frac{56,82}{s + 34,1} \quad (4.40)$$

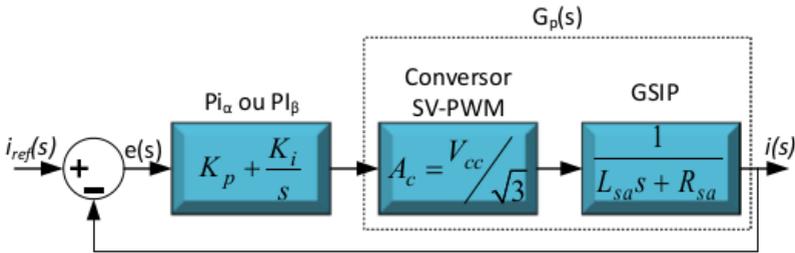


Figura 19 – Malha de controle da planta.

Para determinar os parâmetros:  $K_p$  e  $K_i$  impõe-se um tempo de resposta de 5% ( $tr_5$ ) do sistema em malha fechada três vezes menor que a constante de tempo  $\tau$  da planta em malha aberta, calculado por:

$$t_{r5} = \frac{\tau}{3} = \frac{29,3 \cdot 10^{-3}}{3} = 9,8ms \quad (4.41)$$

Com o tempo de resposta e o fator de amortecimento ( $\xi$ ) de  $1/\sqrt{2}$ , que define o sobressinal de aproximadamente 5%, pode-se calcular: a

frequência natural não amortecida ( $\omega_n$ ) e amortecida ( $\omega_d$ ), para um sistema padrão de segunda ordem, por:

$$t_{r5} = \frac{3}{\omega_n \xi} \quad (4.42)$$

E a frequência natural amortecida, por:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.43)$$

Na aplicação das equações 4.42 e 4.43 resultam os seguintes valores:

$$\begin{aligned} \omega_n &= 433,9 \text{ rad/s} \\ \omega_d &= 306,8 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

Conforme Figura 20, aplicando a condição angular e a de módulo, tem-se:

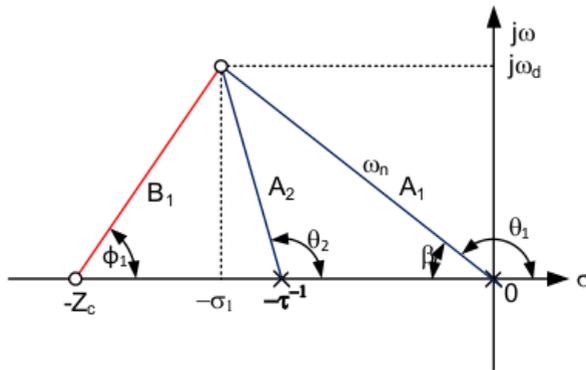


Figura 20 – Mapa do lugar das raízes.

Condição de ângulo:

$$\angle G(s) = \pm \pi \rightarrow (2k + 1) \text{ em que } k = 0, 1, 2, \dots \quad (4.44)$$

$$\theta_1 = 180^\circ - \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 135^\circ \quad (4.45)$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \arctg\left(\frac{\omega_d}{\sigma_1 - \tau^{-1}}\right) = 131,63^\circ \quad (4.46)$$

$$\phi_1 - \theta_1 - \theta_2 = -180^\circ \Rightarrow \phi_1 = 86,63^\circ \quad (4.47)$$

Como:

$$\beta = 180 - \theta_1 = 45^\circ \quad (4.48)$$

Então:

$$\sigma_1 = \omega_d = 306,8 \quad (4.49)$$

$$\tan(\phi_1) = \frac{\omega_d}{Z_c - \sigma_1} \Rightarrow Z_c = 324,86 \quad (4.50)$$

E por consequência:

$$Z_c = \frac{K_i}{K_p} \Rightarrow T_i = 0,0031 \quad (4.51)$$

Para a condição de módulo:

$$|G(s)| = K_p \frac{B_1}{A_1 A_2} \frac{A_c}{L_g} = 1 \Rightarrow K_p = 0,0442 \quad (4.52)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 14,3485 \quad (4.53)$$

E assim a equação do controle proporcional-integral (PI) fica:

$$PI_\alpha = K_p + \frac{K_i}{s} = 0,0442 + \frac{14,3485}{s} \quad (4.54)$$

Como estes parâmetros são fornecidos para dispositivos digitais reescreve-se a equação 4.54 discretizando para um tempo de amostragem de  $90\mu s$ , tem-se:

$$PI_{dis \alpha} = \frac{0,04417z - 0,04288}{z - 1} \quad (4.55)$$

Sendo que os valores do  $PI_{dis \alpha}$  são iguais ao  $PI_{dis \beta}$ .

#### 4.8.1 Projeto dos controladores de potência reativa e tensão $V_{cc}$

Com base no projeto dos controladores  $PI_{\alpha}$  e  $PI_{\beta}$  para as correntes, na Seção 4.8, é feito de maneira análogo para tensão e potência reativa, obtendo-se as seguintes equações:

Parâmetros do  $PI_{dis V_{cc}}$  discreto para o controle da tensão  $V_{cc}$ :

$$PI_{dis V_{cc}} = \frac{12z - 11,99}{z - 1} \quad (4.56)$$

Parâmetros do  $PI_{dis Q}$  discreto para o controle da potência reativa:

$$PI_{dis Q} = \frac{0,05z - 0,0473}{z - 1} \quad (4.57)$$

#### 4.9 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta o sistema para implementação do CLG, para tanto foi visto: a teoria do GSIP, e seu modelamento; a aplicação do chaveamento utilizando a modulação (SV-PWM) e por fim o projeto dos controles PIs.

Também houve um breve resumo sobre a teoria da potência instantânea ou teoria  $pq$  foi apresentado. Esta teoria mostra-se bastante eficiente e flexível no desenvolvimento de controladores para condicionadores de potência baseados em dispositivos de eletrônica de potência.

Fisicamente, a potência instantânea  $p$  é a energia instantânea total fluindo por unidade de tempo, e  $q$  é a energia trocada entre as fases do sistema sem transferência de energia.

Esta teoria foi usada no cálculo das potências por ser mais conveniente frente a FEM trapezoidal.



## 5 CONVERSOR DO LADO DA REDE

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste Capítulo serão abordados os conceitos que envolvem as características de conexão da rede elétrica, a teoria  $dq$  e o sistema de controle. Além do aprofundamento simétrico e assimétrico.

### 5.2 SISTEMA DE CCLR DA REDE ELÉTRICA

A função do CLR é permitir que a potência ativa e reativa, fornecida pelo GSIP, seja transferida à rede elétrica, buscando o ponto de rastreamento de máxima potência.

O controle vetorial implementado utiliza o sistema de eixos ortogonais  $dq$ , obtidos por meio da transformada de Park, com o eixo alinhado com o fasor resultante da tensão da rede. Isto permitirá o controle da potência ativa e reativa de forma independente. A componente da corrente segundo o eixo  $d$ ,  $i_{rd}$ , irá controlar a potência ativa e a componente da corrente na direção do eixo  $q$ ,  $i_{rq}$ , irá controlar a potência reativa.

A Figura 21 representa o CLR ligado na rede trifásica por meio de um filtro, com indutância  $L_r$  e resistência  $R_r$ .

O controle da potência ativa, ou a referência da malha de controle de corrente  $i_{rd}$ , é determinado pela máxima potência gerada pela turbina eólica  $P_{rede}^{ref}$ . Por outro lado, a referência da malha de controle de corrente  $i_{rq}$  é igual a 0 (zero), que significa potência reativa nula no CCLR.

As equações de tensão do CLR e do circuito elétrico do filtro são:

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + L_r \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ra} \\ e_{rb} \\ e_{rc} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

A Figura 22 é modelada na equação 5.1, este é o circuito elétrico equivalente da rede elétrica nos eixos A, B e C.



de referência (dq0), (PARK, 1929; KRAUSE; WASYNCZUK; SUDHOFF, 2002), como mostrado na Figura 23. Estas equações são invariantes em potência e podem ser usadas tanto para transformação de tensão como de corrente ou ainda de fluxo.

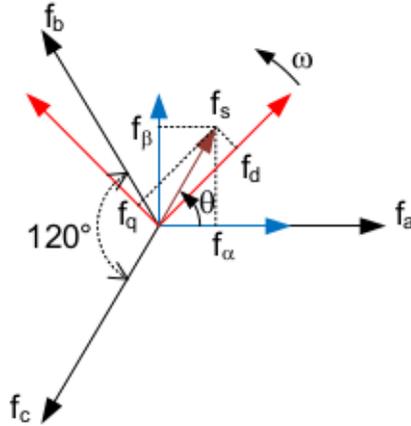


Figura 23 – Transformada de Park

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta_r) & -\text{sen}(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

E a transformada inversa de Park é dada por:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\text{sen}(\theta_r) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Em que a velocidade angular ( $\omega_r$ ) é determinada em função da derivada no tempo da posição instantânea da tensão em relação à fase da rede ( $\theta_r$ ), dado por:

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (5.4)$$

Da mesma maneira que foi feito na Seção 4.3.1, aqui também não há utilização do neutro do sistema, o que permite a utilização de

uma transformada mais simples, já que não se faz o uso da componente zero. Desta forma a transformação é dada por:

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}_d \\ \tilde{f}_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta_r) & -\text{sen}(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

E a transformada inversa de Park de forma simplificada, é dada por:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\text{sen}(\theta_r) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{f}_d \\ \tilde{f}_q \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

### 5.2.2 Detecção digital de malha de fase

Esta posição instantânea em relação à tensão na fase da rede é obtida na grande maioria dos trabalhos por um circuito de malha de detecção de fase, mais conhecido do seu termo inglês (*Phase Locked Loop* - PLL). O PLL é um controlador, do tipo PI, que ajusta o alinhamento das tensões com a tensão de referência da rede.

Nesta tese, a estrutura utilizada foi um circuito de malha de detecção de fase digital, conhecido do seu termo em inglês: *Digital Phase Locked Loop* - DPLL. Este consiste na operação da função arco tangente entre os valores de tensão em  $\alpha$  e  $\beta$  obtendo assim o sincronismo com a tensão da rede. De forma muito mais simples quando comparado ao PLL tradicional, conforme (KANDEEPAN; REISENFELD, 2004).

### 5.2.3 Equações em $dq$ da rede elétrica

Considerando-se um sistema de eixos de referência em sincronismo com a tensão da rede, com o aplicação de um circuito DPLL, e que o fasor tensão da rede está alinhado com o eixo d, tem-se:

$$\begin{cases} v_{rd} = E_{rd} \\ v_{rq} = 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

Da equações 5.1 do controle do conversor do lado da rede, aplicando a transformação de Park, obtém-se:

$$v_{rcd} = v_{rd} + R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_{re} L_r i_{rq} \quad (5.8)$$

$$v_{rcq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_{re} L_r i_{rd} \quad (5.9)$$

As equações 5.8 e 5.9, são reescritas com o propósito de linearizar as equações, separando os termos de compensação:

$$v_{rcd} = v'_{rd} + v_{rd} \text{ comp.} \quad (5.10)$$

$$v_{rcq} = v'_{rq} + v_{rq} \text{ comp.} \quad (5.11)$$

Comparando as equações 5.8 e 5.9 com as equações 5.10 e 5.11, obtêm-se as equações linearizadas:

$$v'_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} \quad (5.12)$$

$$v'_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} \quad (5.13)$$

E desta maneira os termos de compensação são:

$$v_{rd} \text{ comp.} = E_{rd} - \omega_{re} L_r i_{rq} \quad (5.14)$$

$$v_{rq} \text{ comp.} = \omega_{re} L_r i_{rd} \quad (5.15)$$

As equações de potência ativa e reativa são, respectivamente:

$$P_r = E_{rd} i_{rd} + E_{rq} i_{rq} \quad (5.16)$$

$$Q_r = E_{rq} i_{rd} - E_{rd} i_{rq} \quad (5.17)$$

Fazendo-se  $E_{rq} = 0$ , conforme considerado na equação 5.7, as equações de potência ativa, equação 5.16, e reativa equação 5.17, são reduzidas, respectivamente, para:

$$P_r = E_{rd} i_{rd} \quad (5.18)$$

$$Q_r = -E_{rd} i_{rq} \quad (5.19)$$

### 5.2.4 Potência de referência da rede no ponto de MPPT

A máxima potência que a turbina eólica pode produzir para cada velocidade de rotação é função do máximo coeficiente de potência ( $C_{p\ max}$ ) e do *Tip Speed Ratio* ótimo ( $\lambda_{oti}$ ), conforme abordado na Seção 3.2.1:

$$P_{turb\ max} = \frac{1}{2} \rho A C_{p\ max} \left( \frac{\omega_m R}{\lambda_{oti}} \right)^3 = K_{oti} \omega_m^3 \quad (5.20)$$

em que:

$$K_{oti} = \frac{1}{2} \rho A C_{p\ max} \left( \frac{R}{\lambda_{oti}} \right)^3$$

A potência entregue à rede, na condição de máxima potência, é dada por:

$$P_{rede}^{ref.} = K_{oti} \omega_m^3 - J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} - V_{cc} C \frac{dV_{cc}}{dt} \quad (5.21)$$

em que  $J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt}$  é a potência absorvida pela inércia da turbina e  $V_{cc} C \frac{dV_{cc}}{dt}$  é a potência entregue ao capacitor, levando-se em consideração que em regime não há variação de  $\omega_m$  e nem de  $V_{cc}$ . Sendo a derivada destes termos nulo, obtém-se a equação:

$$P_{rede}^{ref.} = K_{oti} \omega_m^3 \quad (5.22)$$

### 5.2.5 Cálculo do filtro da rede

O projeto do filtro RL baseia-se em encontrar o valor da indutância série de tal forma a satisfazer os limites estabelecidos em normas, diminuindo o nível do conteúdo harmônico no sistema (SOUZA, 2000).

Como o inversor opera na frequência de chaveamento ( $f_{cr}$ ) de 16 kHz e por consequência a mesma frequência ao qual será submetida o filtro. E ainda, a corrente máxima de ondulação ( $i_{mo}$ ) medida nestas condições foi de 1,2 A, desta maneira a indutância pode ser obtida por:

$$L_r = \frac{E_{ra}}{2\sqrt{6} \cdot f_{cr} \cdot i_{mo}} = \frac{220}{2\sqrt{6} \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 1,2} = 2,3\ mH. \quad (5.23)$$

em que:

$f_{cr}$ : Frequência de operação do indutor (Hz);

$i_{mo}$ : Corrente máxima de ondulação (A).

Na prática foi dimensionado um indutor ( $L_r$ ) de 2,5 mH, com uma capacidade de corrente de 10 A e este possui uma resistência interna intrínseca ( $R_r$ ) de 0,6  $\Omega$ .

Porém com este filtro ainda se observa um grande conteúdo harmônico o que motivou a utilização da FEM reconstruída no controle do conversor do lado do gerador e não a tensão nos terminais do gerador.

### 5.2.6 Projeto dos controladores discretos $PI_{Drd}$ e $PI_{Drq}$ de corrente na rede

Com base no projeto dos controladores do lado do gerador (CLG), na Seção 4.8, aqui repete-se o mesmo procedimento, porém os parâmetros do PI discreto de eixo direto da rede ( $PI_{Drd}$ ) e do eixo em quadratura ( $PI_{Drq}$ ) são para um tempo máximo suportado pelo processador digital de sinais (DSP) de 70 $\mu$ s de amostragem. Assim o controle de corrente em  $I_d$  é dado por:

$$PI_{Drd} = \frac{1,5z - 1,5}{z - 1} \quad (5.24)$$

O controle discreto tem os mesmos elementos na malha de controle em  $d$  e  $q$ . Razão pela qual os parâmetros do  $PI_{Drd}$  são iguais aos do  $PI_{Drq}$ .

## 5.3 AFUNDAMENTO SIMÉTRICO

Durante o afundamento simétrico, há uma transição gradual em rampa entre a potência ativa e a reativa, ou seja, reduz-se a potência ativa e injeta-se a mesma quantidade de potência reativa, como pode ser observado na Figura 24-a. Contudo se a corrente extrapolar o limite de 13 A, a potência reativa será limitada até um valor seguro, sem colocar em risco os componentes do sistema, conforme pode ser verificado na Figura 24-b (GHOSH; LEDWICH, 2002; MIRANDA, 2014).



O termo imaginário “j” nestas equações é implementado usando um filtro passa tudo (all pass filter), com um deslocamento de  $90^\circ$ , conforme (SONG; NAM, 1999).

A equação do filtro de segunda ordem usando a transformada de Laplace é:

$$H(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \omega_0 s / Q_0 + \omega_0^2} \quad (5.27)$$

As componentes simétricas obtidas, tanto de tensão como de corrente na rede, são transformadas nos eixos de referência  $dq$  de sequência positiva e negativa.

Assim como na Subseção 5.2.2, também tem se a aplicação do circuito DPLL para a detecção do ângulo das tensões de sequência positiva e o ângulo das tensões de sequência negativa. E os ângulos das duas sequências são os mesmos, porém com sinais contrários, uma vez que os eixos giram em sentidos opostos.

As tensões trifásicas assimétricas da rede  $\{\vec{e}_{ra}, \vec{e}_{rb}, \vec{e}_{rc}\}$ , podem ser representadas como a soma ortogonal das tensões de sequência positiva e negativa, tal que:

$$\vec{e}_{rdq} = e^{j\omega_{re}t} \vec{e}_{rdq}^+ + e^{-j\omega_{re}t} \vec{e}_{rdq}^- \quad (5.28)$$

$$\vec{e}_{rdq}^+ = \vec{e}_{rd}^+ + j\vec{e}_{rq}^+ \quad (5.29)$$

$$\vec{e}_{rdq}^- = \vec{e}_{rd}^- + j\vec{e}_{rq}^- \quad (5.30)$$

$$\omega_{re} = 2\pi f_r \quad (5.31)$$

em que:  $f_r$  é  $60Hz$ .

O termo  $e^{j\omega_{re}t} \vec{e}_{rdq}^+$  gira no sentido anti-horário, e indica a sequência positiva, enquanto o termo  $e^{-j\omega_{re}t} \vec{e}_{rdq}^-$  gira no sentido horário e indica sequência negativa.

A equação de tensão da rede no sistema de eixos  $dq$  é:

$$\vec{e}_{rdq} = \vec{v}_{rdq} + L_r \frac{d\vec{i}_{rdq}}{dt} + R_r \vec{i}_{rdq} \quad (5.32)$$

Aplicando as equações 5.28 e 5.32 e desenvolvendo as equações em termos de sequência positiva e negativa que expressam os módulos

destacados com o mesmo nome na Figura 25, obtêm-se (SONG; NAM, 1999):

$$\vec{e}_{rdq}^+ = L_r \frac{d\vec{i}_{rdq}^+}{dt} + R_r \vec{i}_{rdq}^+ + j\omega L_r \vec{i}_{rdq}^+ + \vec{v}_{rdq}^+ \quad (5.33)$$

$$\vec{e}_{rdq}^- = L_r \frac{d\vec{i}_{rdq}^-}{dt} + R_r \vec{i}_{rdq}^- - j\omega L_r \vec{i}_{rdq}^- + \vec{v}_{rdq}^- \quad (5.34)$$

Com a tensão assimétrica extraída nos sistemas de sequência positiva e negativa, e o mesmo ocorrendo com a corrente, a potência aparente pode ser calculada por:

$$\vec{S}_r = \left( e^{j\omega_{re}t} \vec{e}_{rdq}^+ + e^{-j\omega_{re}t} \vec{e}_{rdq}^- \right) \left( e^{j\omega_{re}t} \vec{i}_{rdq}^+ + e^{-j\omega_{re}t} \vec{i}_{rdq}^- \right) \quad (5.35)$$

Da equação geral de potência aparente  $S = P + jQ$ , pode se extrair a potência ativa ( $P$ ) e reativa ( $Q$ ):

$$P_r(t) = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega_{re}t) + P_{s2} \sin(2\omega_{re}t) \quad (5.36)$$

$$Q_r(t) = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega_{re}t) + Q_{s2} \sin(2\omega_{re}t) \quad (5.37)$$

em que:

$$P_0 = \frac{3}{2} \left( \vec{e}_{rd}^+ \vec{i}_{rd}^+ + \vec{e}_{rq}^+ \vec{i}_{rq}^+ + \vec{e}_{rd}^- \vec{i}_{rd}^- + \vec{e}_{rq}^- \vec{i}_{rq}^- \right) \quad (5.38)$$

$$P_{c2} = \frac{3}{2} \left( \vec{e}_{rd}^+ \vec{i}_{rd}^- + \vec{e}_{rq}^+ \vec{i}_{rq}^- + \vec{e}_{rd}^- \vec{i}_{rd}^+ + \vec{e}_{rq}^- \vec{i}_{rq}^+ \right) \quad (5.39)$$

$$P_{s2} = \frac{3}{2} \left( \vec{e}_{rq}^+ \vec{i}_{rd}^+ + \vec{e}_{rd}^- \vec{i}_{rq}^- - \vec{e}_{rq}^- \vec{i}_{rd}^- + \vec{e}_{rd}^+ \vec{i}_{rq}^+ \right) \quad (5.40)$$

$$Q_0 = \frac{3}{2} \left( \vec{e}_{rq}^+ \vec{i}_{rd}^+ - \vec{e}_{rd}^+ \vec{i}_{rq}^+ + \vec{e}_{rq}^- \vec{i}_{rd}^- - \vec{e}_{rd}^- \vec{i}_{rq}^- \right) \quad (5.41)$$

$$Q_{c2} = \frac{3}{2} \left( \vec{e}_{rq}^+ \vec{i}_{rd}^- - \vec{e}_{rd}^+ \vec{i}_{rq}^- + \vec{e}_{rq}^- \vec{i}_{rd}^+ - \vec{e}_{rd}^- \vec{i}_{rq}^+ \right) \quad (5.42)$$

$$Q_{s2} = \frac{3}{2} \left( \vec{e}_{rd}^+ \vec{i}_{rd}^- + \vec{e}_{rq}^+ \vec{i}_{rq}^- - \vec{e}_{rd}^- \vec{i}_{rd}^+ - \vec{e}_{rq}^- \vec{i}_{rq}^+ \right) \quad (5.43)$$

A potência pode ser representada na forma matricial, como:

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_{s2} \\ P_{c2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} e_{rd}^+ & e_{rq}^+ & e_{rd}^- & e_{rq}^- \\ e_{rq}^+ & -e_{rd}^+ & e_{rq}^- & -e_{rd}^- \\ e_{rq}^- & -e_{rd}^- & -e_{rq}^+ & e_{rd}^+ \\ e_{rd}^- & e_{rq}^- & e_{rd}^+ & e_{rq}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd}^+ \\ i_{rq}^+ \\ i_{rd}^- \\ i_{rq}^- \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

De acordo com a equação 5.44 as correntes pode ser expressas por:

$$\begin{bmatrix} i_{rd}^+ \\ i_{rq}^+ \\ i_{rd}^- \\ i_{rq}^- \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} e_{rd}^+ & e_{rq}^+ & e_{rd}^- & e_{rq}^- \\ e_{rq}^+ & -e_{rd}^+ & e_{rq}^- & -e_{rd}^- \\ e_{rq}^- & -e_{rd}^- & -e_{rq}^+ & e_{rd}^+ \\ e_{rd}^- & e_{rq}^- & e_{rd}^+ & e_{rq}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_{s2} \\ P_{c2} \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

Fazendo  $[P_0 \ Q_0 \ P_{s2} \ P_{c2}] = [P_{rede}^{ref.} \ 0 \ 0 \ 0]$ , as correntes obtidas são as correntes de referência  $i_{dq}$  de sequência positiva e negativa, em função da potência de referência gerada, desenvolvida na equação 5.22, e assim obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} i_{rd}^+ \\ i_{rq}^+ \\ i_{rd}^- \\ i_{rq}^- \end{bmatrix} = \frac{2P_{rede}^{ref.}}{3D} \begin{bmatrix} e_{rd}^+ \\ e_{rq}^+ \\ -e_{rd}^- \\ -e_{rq}^- \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

em que:

$$D = [(e_{rd}^+)^2 + (e_{rq}^+)^2] - [(e_{rd}^-)^2 + (e_{rq}^-)^2] \neq 0$$

## 5.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo de maneira similar ao CLG, visto no capítulo anterior, apresentou as condições necessárias para implementação do CLR. Sucintamente descreve-se a teoria  $dq$  bem como seu equacionamento; o circuito de detecção de fase, utilizando o DPLL; dimensionamento dos filtro e também o projeto dos controladores.

Foi tratado de características específicas para o afundamento simétrico e técnicas utilizadas, e o mesmo se repetindo para o afundamento assimétrico. Nestes dois casos apresentando o esquema geral e os conceitos utilizados.



## 6 SIMULAÇÃO

### 6.1 INTRODUÇÃO

As simulações foram executadas no *software* Matlab com os recursos do Simulink afim de validar a modelagem dos sistemas. São apresentados os circuitos que foram simulados, no lado do gerador e da rede, bem como as respostas de tensão, corrente e potência para as situações de operação normal, e durante afundamentos simétricos e assimétricos da tensão na conexão com à rede elétrica.

Os dados utilizados para esta simulação encontram-se no Apêndice B.

### 6.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DO LADO DO GERADOR

O circuito de potência é composto pelo GSIP com FEM trapezoidal, pelo conversor trifásico pelos sensores de corrente e tensão, e o *encoder* de posição.

O diagrama de controle possui o bloco que gera a FEM do gerador a partir da posição do rotor e de sua velocidade, as transformadas de Clark que decompõe as correntes nos eixos estacionários, o cálculo das correntes de referência com base na teoria pq, e os controladores PI das correntes em alfa e beta. Além disto também há o controle da tensão no barramento CC e o controle de potência reativa.

O bloco do barramento CC, serão conectado ao circuito de alimentação do lado da rede.

Afim de capturar todas as informações pertinentes ao lado do gerador, tais como: tensão, corrente, velocidade e potência um bloco de medição integra a gravação de todos estes valores.

O parâmetro velocidade mecânica de rotação é transmitido para o outro bloco, por outro lado, há o recebimento do parâmetro potência medida da rede.

Esta montagem é apresentada no diagrama da Figura 26.

### 6.3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DO LADO DA REDE

Um circuito muito similar ao esquema apresentado do lado do gerador na alimentação, também é construído no lado da rede, exceto

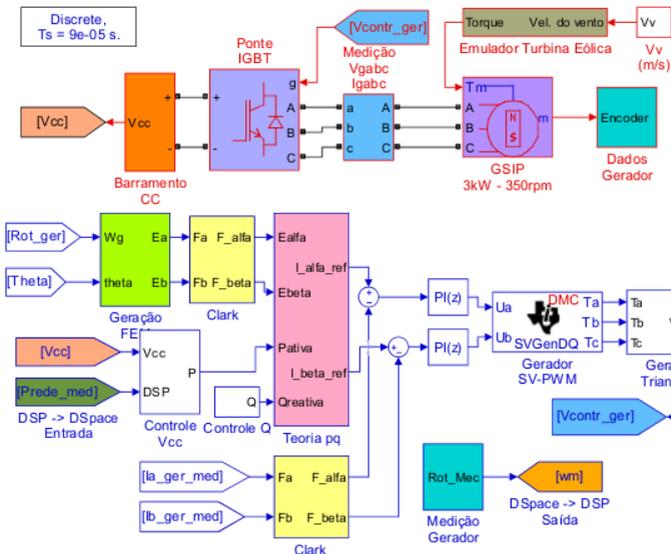


Figura 26 – Diagrama de simulação do controle do lado do gerador.

pela adição de um filtro (RL), conforme é mostrado na Figura 27. O bloco do barramento CC, é conectado ao circuito de alimentação do lado do gerador.

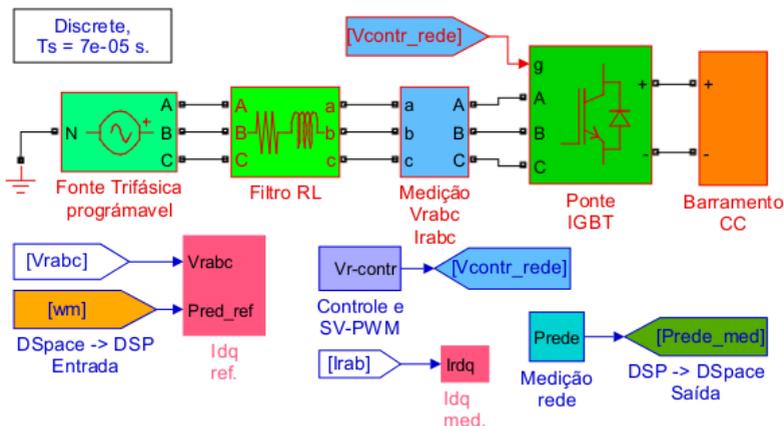


Figura 27 – Diagrama de simulação do controle do lado da rede.

Os blocos “Idq ref.”, “Idq med.” e o “Controle e SV-PWM”, serão descritos na sequência.

Neste diagrama também há um bloco que grava as variáveis de interesse denominado “medição de rede”.

A Figura 28 que representa o conteúdo do bloco “idq ref.” da Figura 27 que representa o diagrama dos blocos de: MPPT, DPLL e corrente Idq de referência da sequência positiva do lado da rede.

As tensões da rede  $V_{ra}$ ,  $V_{rb}$  e  $V_{rc}$  são condensadas na variável  $V_{rabc}$ . Estas tensões são decompostas em seqüências positiva e negativa, conforme equações desenvolvidas na Seção 5.4.

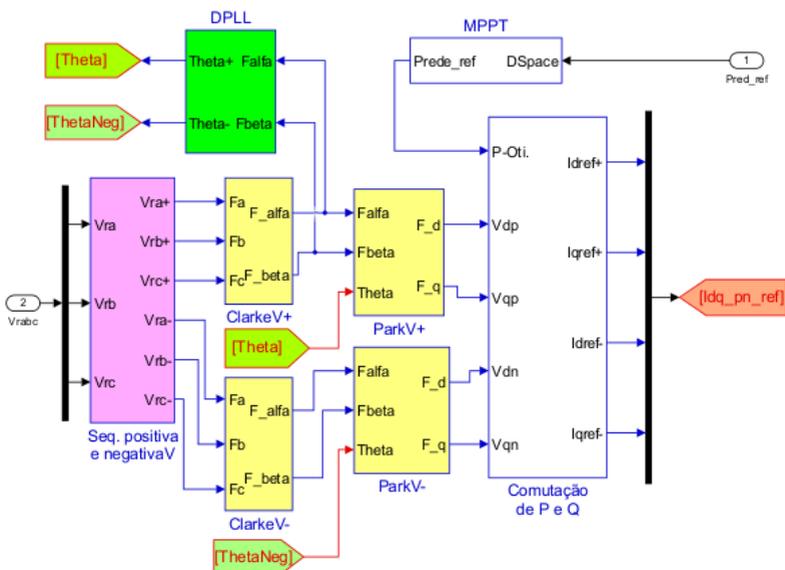


Figura 28 – Diagrama do MPPT, DPLL e corrente Idq de referência da sequência positiva do lado da rede.

Na Seção 4.3.1 foi analisada a transformada de Clarke, aqui há dois blocos que executam esta transformada, sendo um para tensão de seqüência positiva e outra negativa.

A geração dos ângulos  $Theta$  e  $ThetaNeg$  são obtidos da tensão em  $alfa$  e  $beta$ , por meio de um circuito DPLL, conforme foi visto na Seção 5.2.2.

A transformada de Park, conforme abordado na Seção 5.2.1, é calculado a partir dos parâmetros: alfa, beta e Theta. Na seqüência positiva utiliza-se o ângulo “Theta”, e para a seqüência negativa deve se fazer uso de “ThetaNeg”.

O bloco “Comutação de P e Q” é o responsável pela detecção do afundamento. Se for detectado que o afundamento é o mesmo em todas as fases, o afundamento é dito simétrico, por outro lado, se o afundamento tiver valores diferente e quaisquer fases, é dito assimétrico.

A comutação ocorre somente se o afundamento for simétrico, neste caso, comuta-se o valor de potência ativa para reativa, obedecendo o valor máximo de 13 A, conforme já descrito na Seção ??.

Por fim, as correntes de referências em  $I_d$  e  $I_q$  de sequência positiva e negativa, são calculadas obtendo-se as tensões nos mesmos eixos e sequências que as correntes. A potência calculada no MPPT, já foi discutido na Seção 5.2.4.

O bloco “Idq med” da Figura 27 em que há a geração das correntes medidas em  $I_d$  e  $I_q$  de sequência positiva e negativa são obtidos da mesma forma que no bloco “IdqRef”, com as correntes medidas em  $I_{ra}$  e  $I_{rb}$  decomposta em sequência positiva e negativa, com as transformações sucessivas de Clarke e Park e são apresentadas na Figura 29.

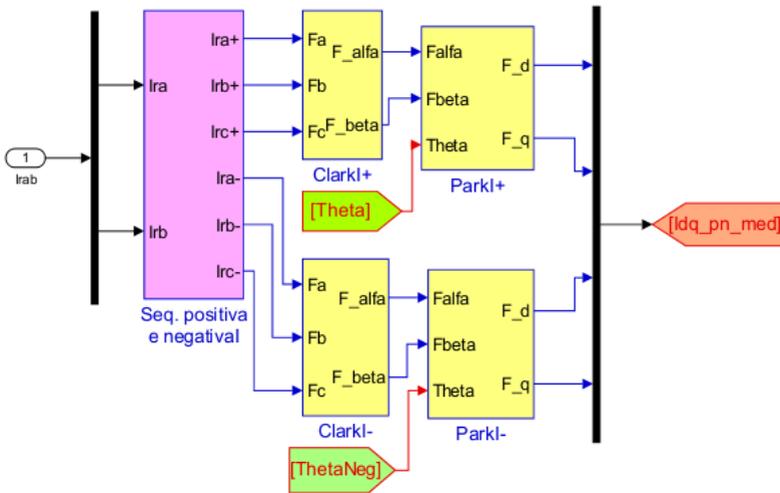


Figura 29 – Diagrama de corrente Idq de referência da sequência negativa do lado da rede.

Na Figura 30 é apresentado o bloco que gera os pulsos para a ponte dos IGBTs, com as correntes  $dq$  de sequência positiva e negativa de referências e medidas. Faz-se o controle de cada uma delas com um controlador PI e posteriormente o bloco de acoplamento, conforme foi visto na Seção 5.2.3.

Estes fornecem o valor da tensão  $\mathbf{U}_a$  e  $\mathbf{U}_b$  de controle que representam tanto o circuito de sequência positiva quanto o de negativa.

A saída do circuito gerador do SV-PWM é comparado com o circuito de geração triangular. Que são os pulsos aplicados aos IGBTs, para que aconteça o controle vetorial.

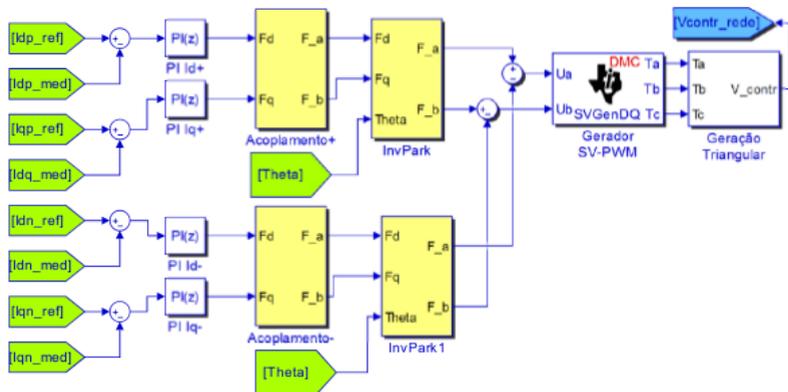


Figura 30 – Diagrama de simulação do controle e geração SV-PWM do lado da rede.

## 6.4 CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO EM REGIME NORMAL

Para verificar a eficiência do sistema, é aplicado um degrau de vento de 5 para 8 m/s e depois de 8 para 5 m/s, forçando uma resposta dinâmica ao sistema e desta maneira evidenciando as características de controle, a relação entre tensões e correntes das fases, e as potências.

Na Figura 31 são apresentados de forma sobreposta os degraus de vento e as curvas de ventos, de 4 a 8 m/s, evidenciando que o sistema segue o MPPT, tanto no degrau de subida quanto no de descida.

O ponto *A* da Figura 31 é o ponto inicial de operação quando a velocidade do vento é de 5 m/s. Quando aplica-se o degrau de velocidade de vento, fazendo com que esta atinja 8 m/s, a potência da turbina desloca-se para o ponto *B* instantaneamente com velocidade constante devido a inércia do aerogerador. A partir deste momento, a turbina acelera descrevendo a trajetória *B-C*.

Quando o procedimento reverso é aplicado, partindo do ponto *C*, a velocidade do vento é reduzida de 8 m/s para 5 m/s e tem-se o mesmo

fenômeno ocorrendo na ordem inversa. Neste instante, a potência é reduzida instantaneamente, conforme descrito pela trajetória  $C-D$ , e a do ponto  $D$  o aerogerador desacelera para buscar o novo ponto de máxima potência que é novamente o ponto  $A$ .

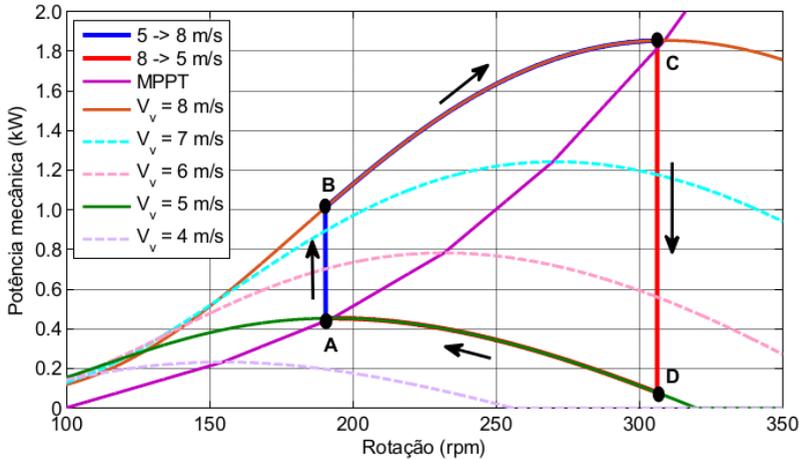


Figura 31 – MPPT do degrau de vento comparado com as curvas de ventos.

A Figura 33 apresenta a FEM reconstruída e a medida, que nada mais do que a tensão a vazio na fase em que a mesma é sincronizada.

Neste caso as duas tensões são obtidos da medição da tensão na saída do gerador, bem como a FEM reconstruída, é obtida pelos valores obtidos do dSPACE.

## 6.5 AFUNDAMENTOS SIMÉTRICOS

O sistema no lado da rede é energizado com tensão de fase de 127 V e foi submetido a um afundamento simétrico de 0,2 pu durante o período de 3 s.

Cabe ressaltar que mesmo se tratando de afundamento simétrico, aparecem nesta seção os termos sequência positiva e negativa, em virtude de que o circuito utilizado é o mesmo para o dois tipos de afundamento, razão pela qual aparecem pequenas variações na sequência negativa.

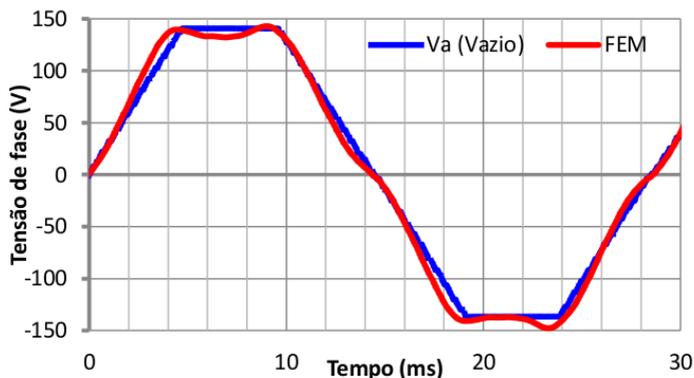


Figura 32 – FEM: medida e reconstruída.

### 6.5.1 Tensão e corrente nos terminais da rede

Na Figura 33 é possível visualizar em detalhes o início do afundamento. Antes que ocorresse o afundamento a corrente estava em fase com a tensão e depois de 6 ciclos a mesma defasada de  $90^\circ$  devido a comutação entre potência ativa e reativa.

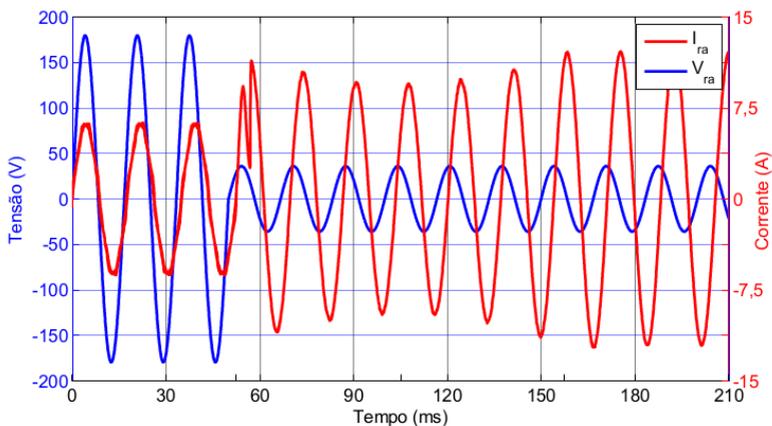


Figura 33 – Tensão de fase e corrente em detalhes na rede.

### 6.5.2 Controle do conversor do lado da rede

Nas Figuras 34 e 35 são apresentadas as respostas do controle no lado da rede, observando-se as correntes medidas e de referência  $I_d$  e  $I_q$  tanto de sequência positiva como as correntes de sequência negativa.

Na Figura 34 as correntes de referência e medidas de sequência positiva estão sobrepostas durante a condição de regime, e apenas durante o período de 100 ms, há uma pequena diferença no transitório em que ocorre o afundamento. A mesma característica foi observada no final do afundamento.

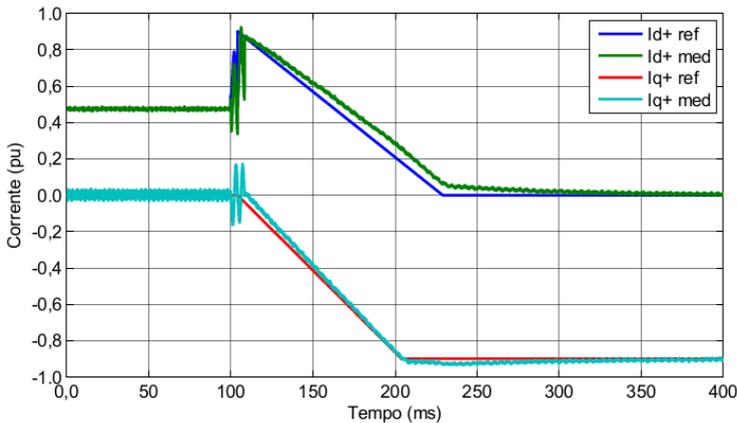


Figura 34 – Corrente de controle em  $I_d$  e  $I_q$  de sequência positiva.

As correntes de controle  $I_d$  e  $I_q$  de sequência negativa em detalhes no início do afundamento, são apresentadas na Figura 35, da mesma forma que ocorreu no caso da sequência positiva, aqui também fica evidente um transitório durante o período de afundamento.

Tanto na Figura 34 como na Figura 35 pode se observar pela sobreposição dos sinais, que quando há estabilização do sistema, os valores medidos e de referência possuem uma variação inferior a 1% entre eles.

### 6.5.3 Tensão e corrente do lado do gerador

Na Figura 36 são mostradas a tensão e a corrente nominal do gerador em detalhes no início do afundamento. A tensão e a corrente

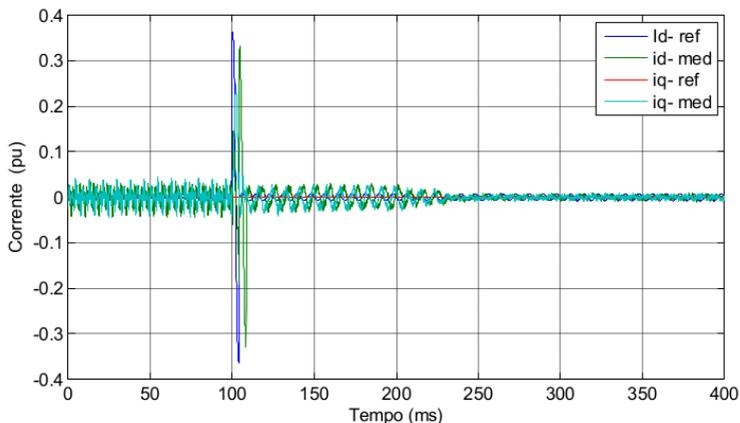


Figura 35 – Corrente de controle em  $I_d$  e  $I_q$  de sequência negativa.

no gerador permanecem em fase, já que aqui há o interesse apenas na potência ativa, tornando a reativa nula. Além disto, ainda é possível constatar que a tensão se manteve constante por todo o período enquanto a corrente sofreu uma atenuação de 9,8 para 1,3 A, conforme esperado.

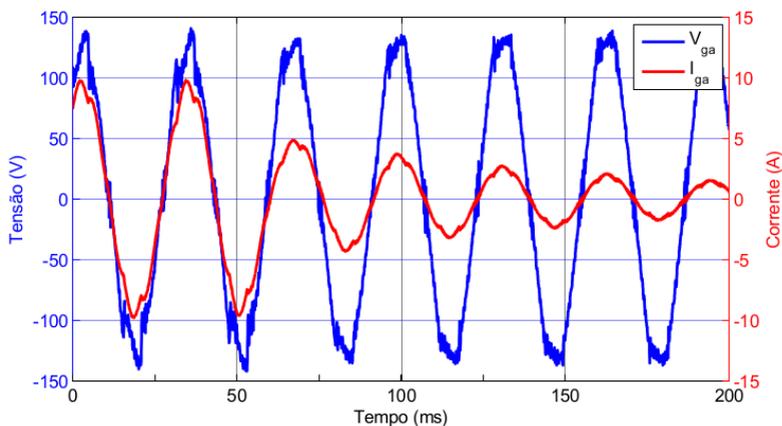


Figura 36 – Tensão de fase e corrente no gerador.

### 6.5.4 Controle do conversor do lado do gerador

Nas simulações das correntes de controle do eixo estacionário em  $\alpha$  e  $\beta$ , é difícil diferenciar quem é a corrente medida e de referência por terem um erro nulo, conforme é apresentado na Figura 37. Então no gráfico apresenta-se a medida de forma tracejada e a outra de forma contínua para que seja possível a visualização de ambas. Desta maneira, fica evidenciando o adequado funcionamento dos controles.

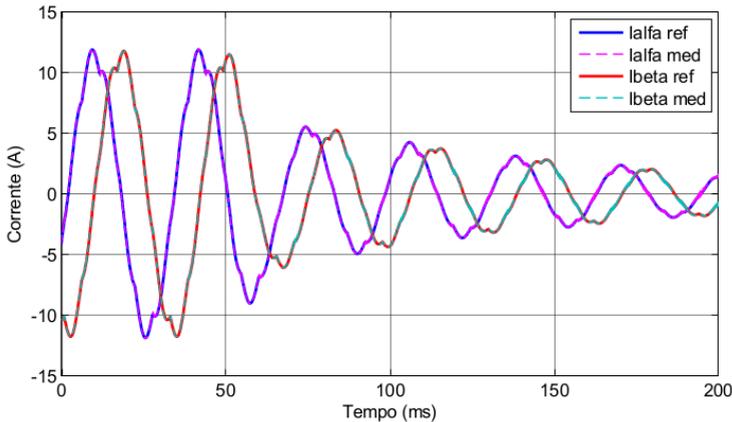


Figura 37 – Corrente de controle em  $I_\alpha$  e  $I_\beta$  no gerador.

### 6.5.5 Tensão $V_{cc}$ , velocidade mecânica e potências

A tensão no barramento CC e a velocidade mecânica no eixo do gerador podem ser visualizadas na Figura 38. A tensão no barramento CC deve se manter em 400 V, e é isto que ocorre durante o regime, mas também há uma pequena oscilação no início e no final do afundamento. Porém este valor instantâneo é de 370 V, e na pior condição, representa 7,5%.

A velocidade mecânica opera em 320 rpm, e não 350 rpm por limitação construtiva do inversor. Quando ocorre o afundamento a velocidade aumenta até um pico de 380 rpm e como a turbina possui uma inércia muito alta, em torno de  $12kg.m^2$ , conforme proposto por (NAGAI; AMEKU; ROY, 2009). Isto impõe um tempo elevado até que a mesma possa voltar à sua velocidade nominal.

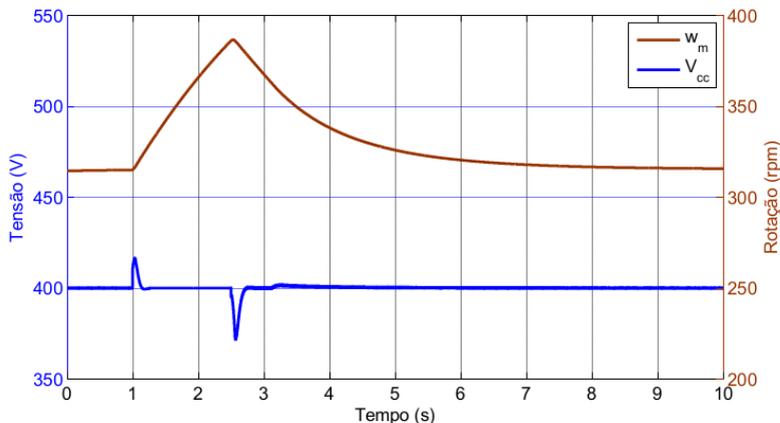


Figura 38 – Tensão  $V_{cc}$  e velocidade mecânica de rotação.

Na Figura 39 são apresentadas a forma de onda da potência mecânica, a potência ativa do gerador e a potência ativa e reativa da rede. Conforme pode-se observar a potência mecânica é maior do que a potência do gerador, que por sua vez é maior do que a potência da rede. A potência ativa da rede é nula durante o afundamento, já que neste caso está inserindo potência reativa. Durante o afundamento o capacitor também descarrega sua energia para o sistema, razão pela qual a potência reativa torna-se maior do que a mecânica.

Como a turbina tem uma inércia elevada, verifica-se que o sistema consome em torno de 10 s, para restabelecer seus valores nominais de potência.

## 6.6 AFUNDAMENTOS ASSIMÉTRICOS

No afundamento assimétrico as tensões de entrada foram submetidos aos mais diversos afundamentos, porém se elegeu um afundamento na tensão da fase **a** de 0,2 pu, da fase **b** de 0,5 pu e da fase **c** de 0,7 pu, para apresentar os resultados. Os resultados são apresentados nesta sequência (0,2-0,5-0,7)pu, indicando o afundamento em cada uma das fases.

Para contemplar a norma brasileira, o sistema foi submetido ao afundamento assimétrico durante o período de 1 s, conforme foi visto na Seção 2.4.

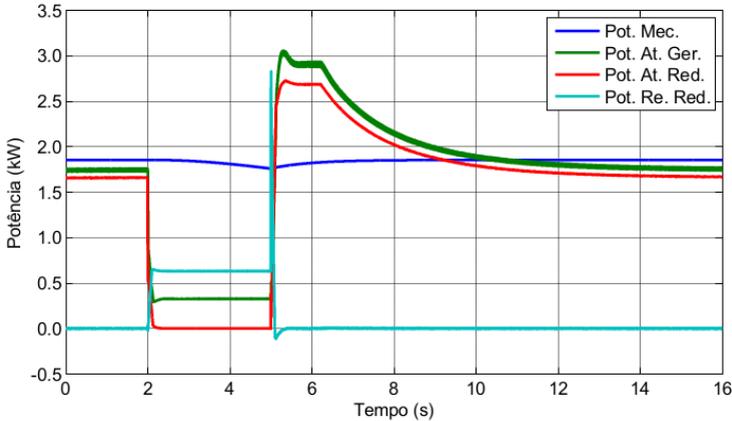


Figura 39 – Potência: mecânica, do gerador e da rede.

### 6.6.1 Tensão e corrente nos terminais da rede

Na Figura 40 é mostrada a tensão instantânea durante o afundamento de 1,0 s. Como todas as tensões são apresentadas simultaneamente no mesmo gráfico, é possível perceber a envoltória no afundamento de tensão e também uma mescla de cores durante o afundamento, distinguindo os diferentes níveis de tensão. Com o intuito de deixar as informações de forma clara, a Figura 40 é apresentada em detalhes no início e no término de seu afundamento conforme é apresentado nas Figuras 41 e 42, respectivamente.

### 6.6.2 Controle do conversor do lado da rede

Da mesma forma que foi apresentado no sistema de afundamento simétrico, aqui também se verifica a eficácia do sistema de controle nas sequências positiva e negativa, das correntes  $I_d$  e  $I_q$ . Na Figura 43 pode se observar nitidamente que a corrente medida segue a corrente de referência nos dois casos ( $I_d$  e  $I_q$ ), havendo uma pequena distorção no início do afundamento e também constatado no término do afundamento.

Conforme esperado no afundamento assimétrico aparece uma corrente  $I_q$  de referência negativa, conforme pode ser observado na Figura 44, mas que também tem seu controle implementado da mesma maneira que na sequência positiva.

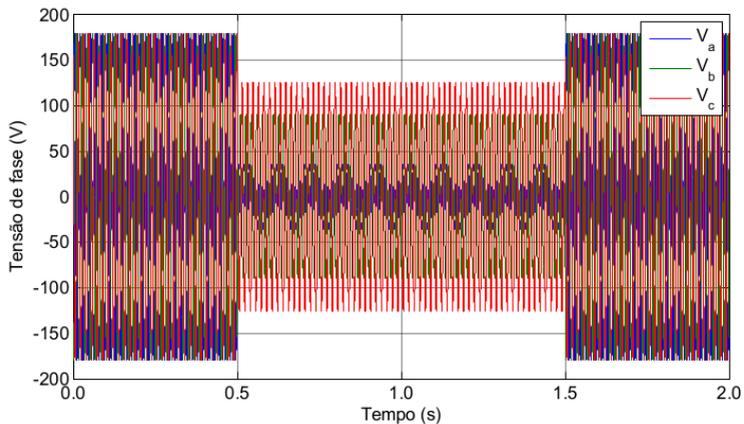


Figura 40 – Tensão instantânea  $V_{abc}$  durante o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

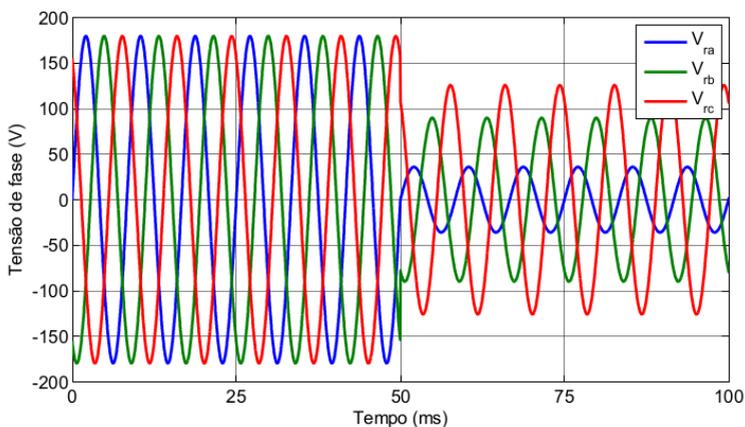


Figura 41 – Tensão instantânea  $V_{abc}$  em detalhes no início do afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

### 6.6.3 Tensão $V_{cc}$ , velocidade mecânica e potências

Na Figura 45 é possível verificar que a rotação aumenta frente ao afundamento, o que ocorre no caso simétrico, e também retorna ao seu valor nominal depois de um tempo significativo.

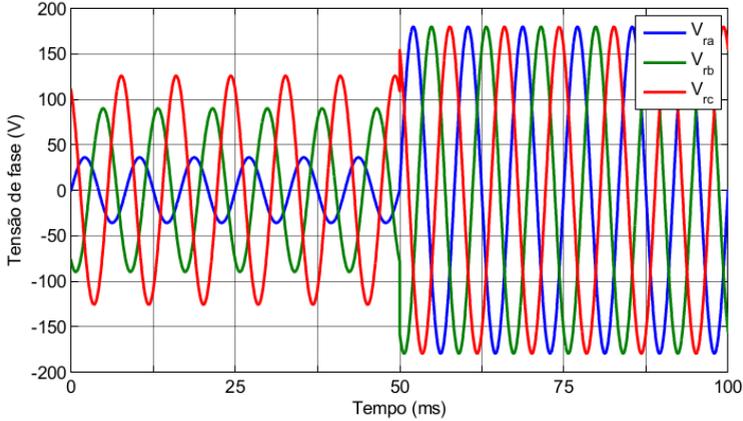


Figura 42 – Tensão instantânea  $V_{abc}$  em detalhes no final do afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

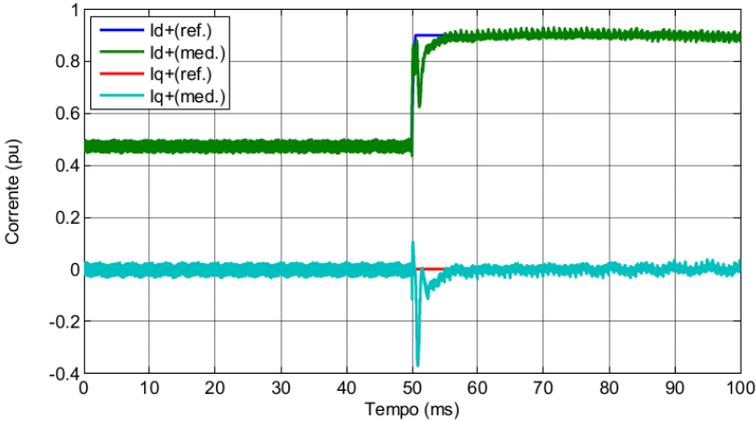


Figura 43 – Corrente de controle de seqüência positiva nos eixos  $dq$  em detalhes no início do afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

A tensão  $V_{cc}$  tem um pico de tensão muito menor, em torno de 10 V de diferença, muito diferente do que ocorre no caso simétrico (30 V de diferença), pois para efeito prático este afundamento não é tão severo quanto o que foi imposto no afundamento simétrico.

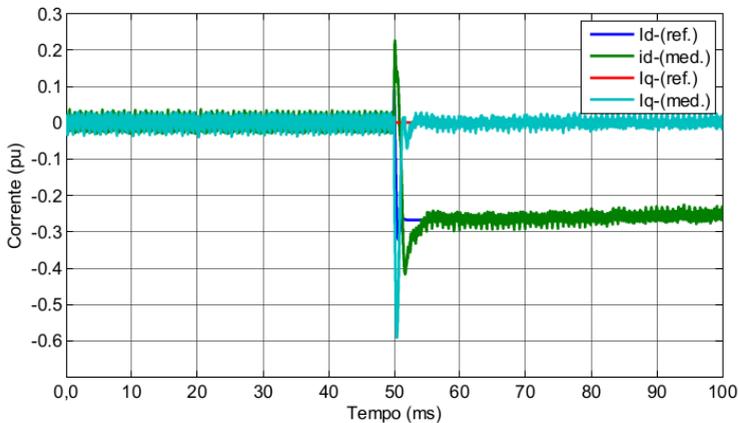


Figura 44 – Corrente de controle de seqüência negativa nos eixos  $dq$  em detalhes no início do afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

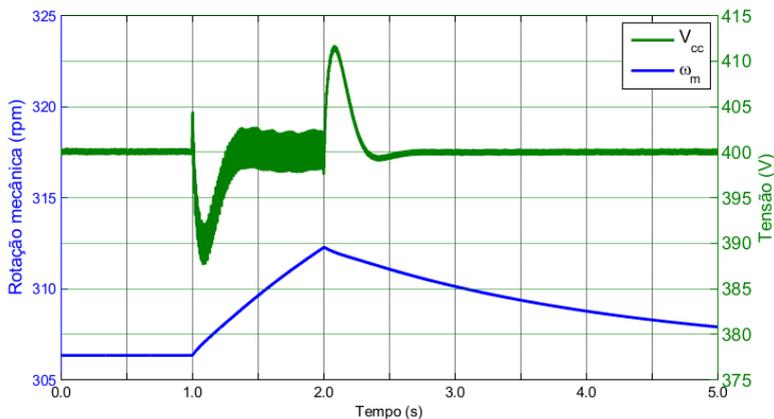


Figura 45 – Tensão no barramento CC e velocidade de rotação mecânica durante o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

Na Figura 46 são apresentadas as potências: mecânica, do gerador e da rede. Durante o afundamento a potência mecânica praticamente permanece inalterada, já as potências do gerador e da rede sofrem um decremento, conforme esperado.

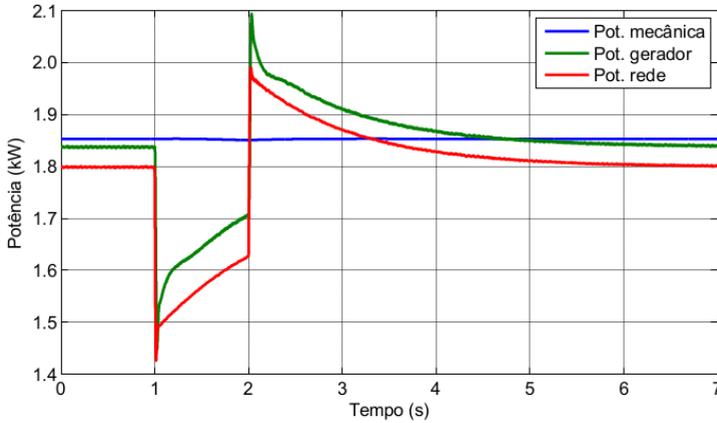


Figura 46 – Potência mecânica, do gerador e da rede durante o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

#### 6.6.4 Tensão $V_{d+}$ e $V_{d-}$

Nas Figuras 47 a 49 são apresentadas a tensão no eixo direto, tanto na sequência positiva quanto na sequência negativa, para que se possa verificar os diferentes afundamentos que o sistema foi submetido, e que os filtros implementados separam a conteúdo as sequências de fases.

### 6.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Com o domínio da teoria e a técnica de construção do sistema, o mesmo foi modelado num software de simulação, e desta maneira foram obtidos os resultados que eram esperados na bancada e apresentados neste capítulo.

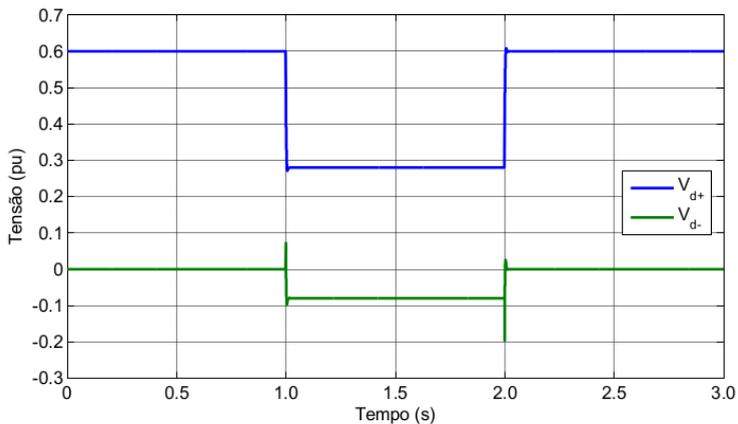


Figura 47 – Tensão de sequência negativa nos eixos dq no afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

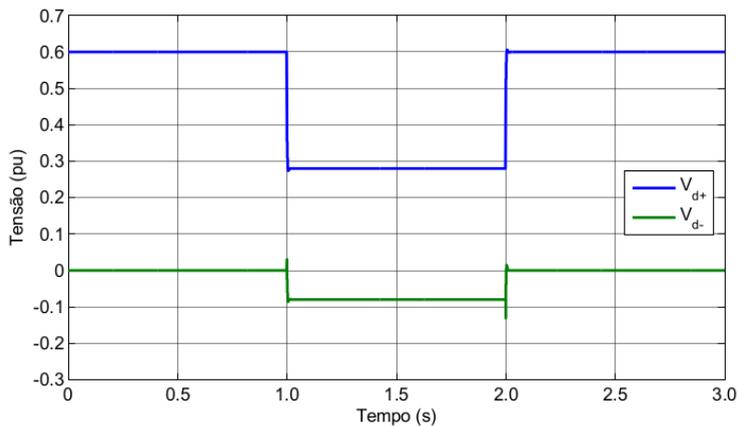


Figura 48 – Tensão de sequência negativa nos eixos dq no afundamento (0,2-0,2-1,0)pu.

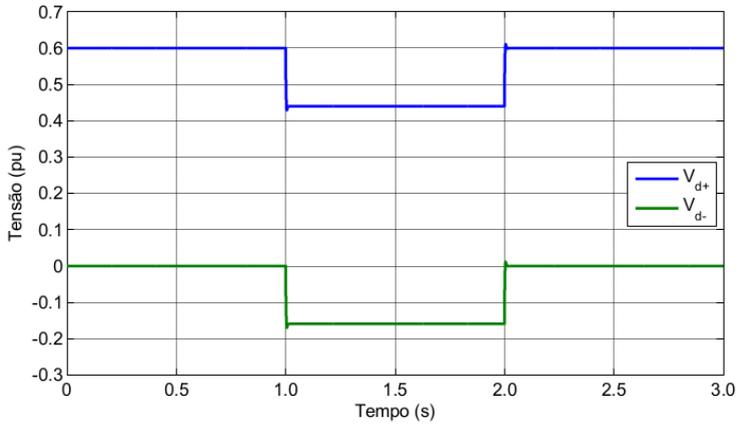


Figura 49 – Tensão de sequência negativa nos eixos dq no afundamento (0,2-1,0-1,0)pu.

## 7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais, tanto na condição nominal quanto na condição de afundamento, do funcionamento do gerador e o acoplamento com a rede elétrica. Estes resultados vêm corroborar a validade da teoria aqui apresentada e quando comparados com as simulações validam os resultados obtidos.

Os ensaios são realizados com uma fonte de tensão CA da Supplier - mod. CAT 1650 de 20 kVA capaz de gerar afundamentos de quaisquer formas. São programados o valor de tensão de saída e a frequência nominal, o percentual e a duração do afundamento.

Além disto, existem as perturbações do ambiente, tais como interferências eletromagnéticas, impondo ruídos a todo sistema. Desta forma é observado a ação dos controladores frente a estes eventos indesejáveis.

Os parâmetros dos equipamentos utilizados nestes ensaios podem ser encontrados no Apêndice B.

### 7.2 OPERAÇÃO EM REGIME NORMAL

Uma condição das mais severas para a garantia do bom funcionamento do sistema é a resposta do mesmo a um degrau de vento e a busca pelo ponto de maior rendimento da turbina eólica.

A velocidade do vento foi incrementada instantaneamente de 5 a 8 m/s e, posteriormente, decrementada do mesmo valor, conforme mostrado na Figura 50. Nesta figura, estão representadas as curvas de potência do aerogerador em função da velocidade de rotação para várias velocidades do vento. Conforme foi discorrido na Seção 6.4.

Quando aplica-se o degrau de velocidade de vento, fazendo com que esta atinja 8 m/s, a potência da turbina desloca-se para o ponto *B* instantaneamente com velocidade constante devido a inércia do aerogerador. A partir deste momento, a turbina acelera descrevendo a trajetória *B-C*, até que a mesma atinja o novo ponto de máxima potência.

Para que todo este sistema opere depende da comunicação entre DSP e DSpace, feito por meio dos conversores A/D e D/A, bem como da precisão de todos os sensores, por estes motivos observa-se um pequeno erro e desta forma não atinge exatamente o ponto de máxima potência,

porém com um erro de aproximadamente 10 rpm, que representa um erro menor do que 4%.

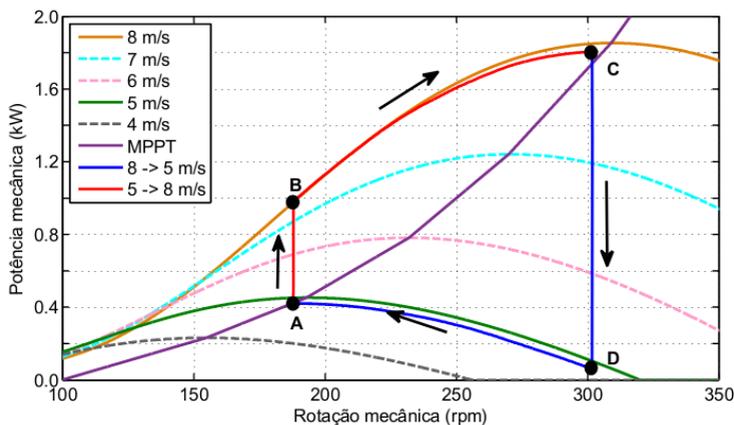


Figura 50 – Degrau de 5 m/s para 8 m/s e de 8 m/s para 5 m/s.

Quando o procedimento reverso é aplicado, partindo do ponto *C*, a velocidade do vento é reduzida de 8 m/s para 5 m/s e tem-se o mesmo fenômeno ocorrendo na ordem inversa.

Novamente ocorre a redução instantaneamente de potência, conforme descrito pela trajetória *C-D*. A partir do ponto *D* o aerogerador desacelera para buscar o novo ponto de máxima potência que é novamente o ponto *A*. Todavia nesta trajetória entre os pontos *D* e *A*, observa-se que há um afastamento maior entre a curva teórica e a obtida de forma experimental.

Cabe ressaltar que a perda de energia do sistema é não linear, e esta são mais significativas em baixa potência, razão pela qual há discrepância entre as curvas acentuadas nesta trajetórias quando comparadas com a curva entre os pontos *B* e *C*.

Com o aumento e o decremento da velocidade do vento, o gerador segue incrementando e decrementando a potência, enquanto que a velocidade de rotação da turbina, devido a sua elevada inércia, varia de forma gradual.

Na Figura 51 é possível observar a tensão e a corrente do gerador em fase, bem como a medição da FEM reconstruída em uma das fases.

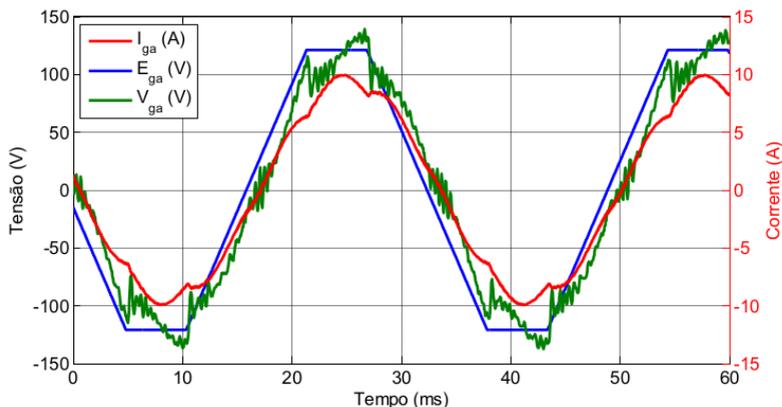


Figura 51 – Tensão de fase, corrente e FEM no gerador.

### 7.3 AFUNDAMENTO SIMÉTRICO

Para a tensão de fase de 127 V é aplicado um afundamento instantâneo simétrico de 20% do valor nominal, durante o período de 3 s, e desta forma analisa-se os valores de tensão, corrente e potência na rede e no gerador, assim como a comutação do envio de energia ativa pelo de energia reativa.

#### 7.3.1 Tensão e corrente nos terminais da rede

A Figura 52 mostra em detalhes a tensão e a corrente da rede na fase A no início do afundamento da tensão. Observa-se a ondulação da tensão durante o afundamento, e que são necessários 9 ciclos para a corrente ficar adiantada de 90° em relação a tensão.

Na Figura 53, onde é mostrado o final do afundamento, a corrente volta a estar em fase com a tensão após outros 9 ciclos. Em ambos os casos, quando a tensão da rede está adequada, a corrente está em fase com a tensão, caracterizando transferência de energia ativa.

#### 7.3.2 Controle do conversor do lado da rede

As Figuras 54 a 57 mostram em detalhes o comportamento das correntes de controle da rede nos eixos dq. Estas figuras ilustram em detalhes a condição de controle tanto no início quanto no final do afun-

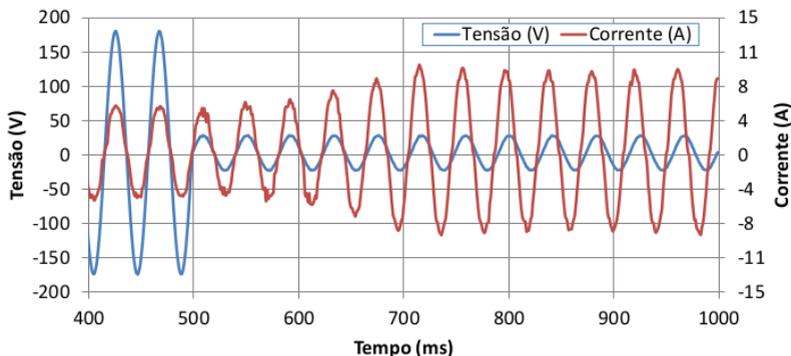


Figura 52 – Detalhe no início do afundamento da rede da tensão e corrente na fase A.

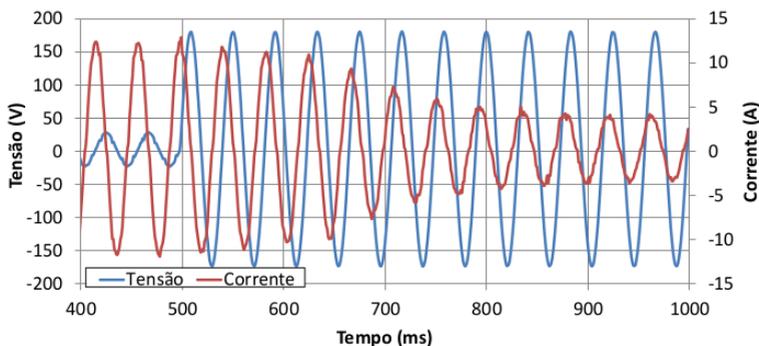


Figura 53 – Detalhe no final do afundamento da rede da tensão e corrente na fase A.

damento, onde o valor medido deve se aproximar o máximo possível do valor de referência e desta forma pode-se observar que é difícil distinguir a diferença entre uma e outra, o que é esperado de um bom controle.

### 7.3.3 Tensão e corrente do lado do gerador

Nas Figuras 58 e 59 observa-se em detalhes a tensão e a corrente na fase A do gerador. A forma de onda da tensão é distorcida, conforme descrito na Seção 4.7. O controle de energia reativa do gerador mantém a corrente sempre em fase com a tensão.

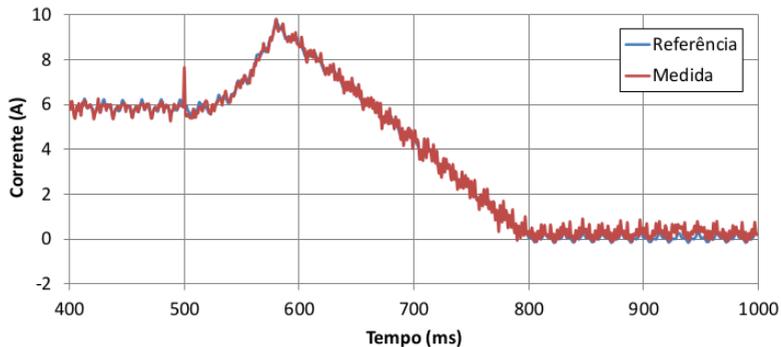


Figura 54 – Controle de corrente  $I_d$  em detalhe no início do afundamento.

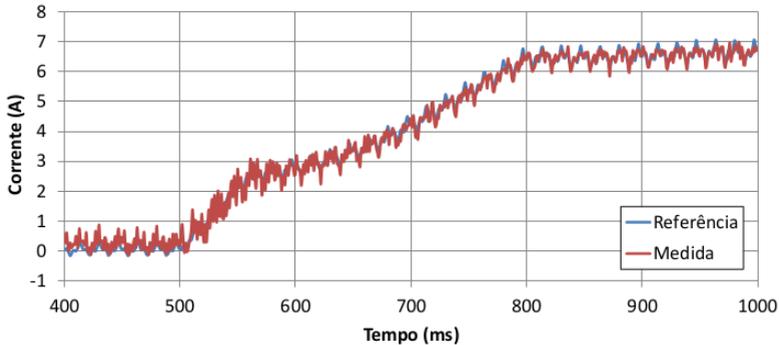


Figura 55 – Controle de corrente  $I_d$  no final do afundamento.

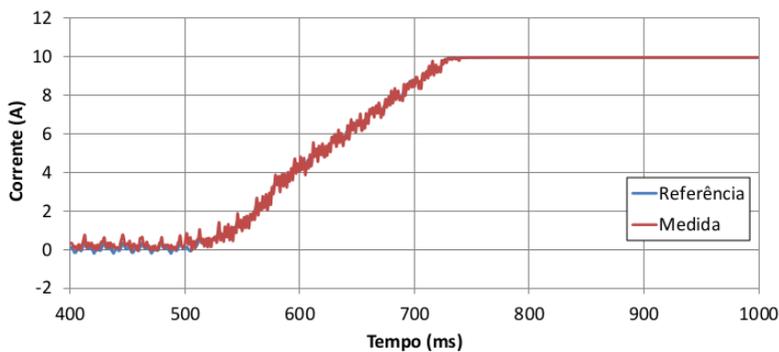


Figura 56 – Controle de corrente  $I_q$  em detalhe no início do afundamento.

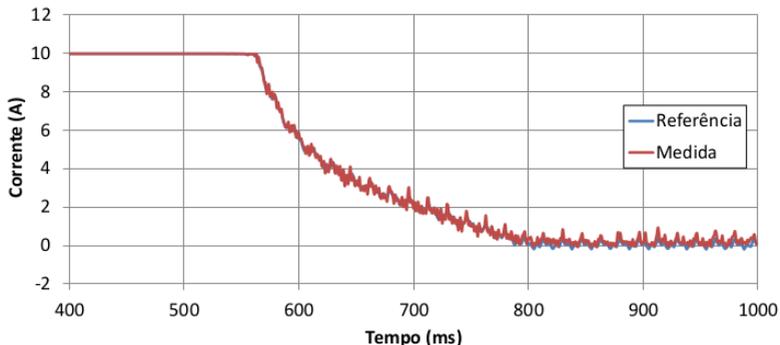


Figura 57 – Controle de corrente  $I_q$  em detalhe no final do afundamento.

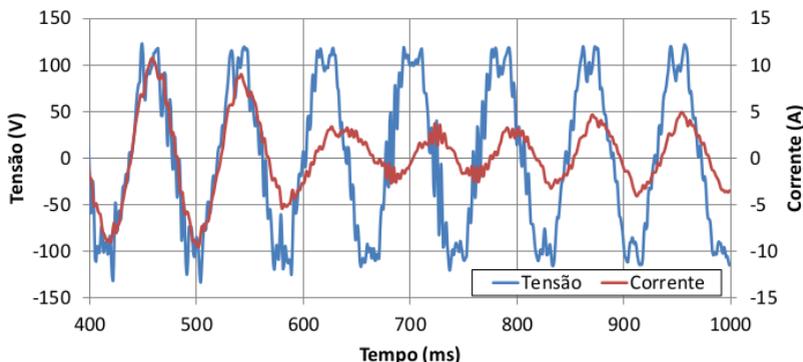


Figura 58 – Detalhe no início do afundamento do gerador da tensão e corrente da fase A.

### 7.3.4 Controle do conversor do lado do gerador

As Figuras 60 a 63 mostram em detalhes o comportamento das correntes de controle do gerador nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$ . Neste caso com a aplicação da teoria pq sobre uma referência de tensão trapezoidal também se observa o efetivo controle entre os valores de referência e os valores medidos, desta forma também atestando o bom controle do lado do gerador.

A comutação de potência ativa com a reativa pode ser observado na Figura 64. Neste caso isto não ocorre na mesma proporção, pois há uma limitação de corrente na transferência de potência reativa, para que não danifique os conversores com o aumento de tensão.

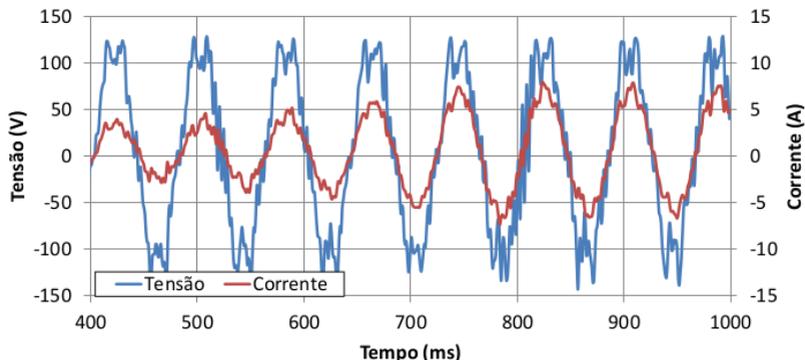


Figura 59 – Detalhe no final do afundamento do gerador da tensão e corrente da fase A.

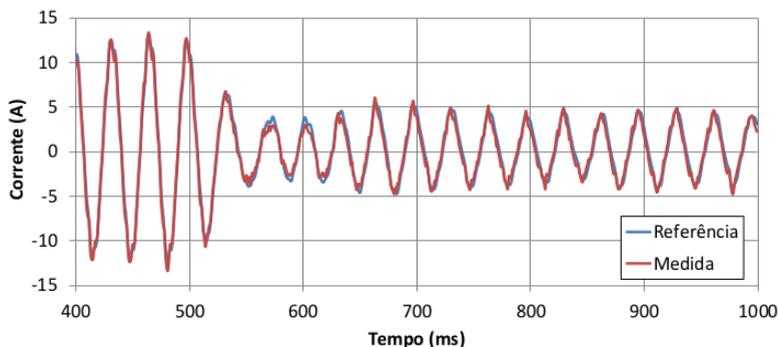


Figura 60 – Controle da corrente  $I_\alpha$  em detalhe no início do afundamento.

Na Figura 65 pode se observar que há um incremento na velocidade da máquina, porém como a inércia da turbina é elevada, o evento se estende por um longo período, para que retorne a velocidade nominal. Vale ressaltar que a tensão  $V_{cc}$  se mantém constante durante todo o tempo, sofrendo alguma perturbação, com oscilações na ordem de 50 V no início e 40 V no final do afundamento.

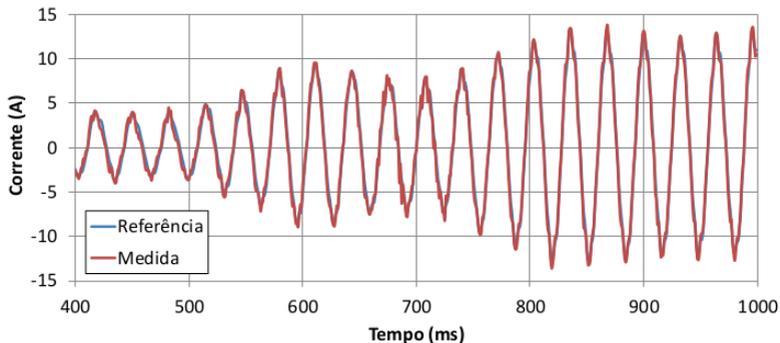


Figura 61 – Controle da corrente  $I_\alpha$  em detalhe no final do afundamento.

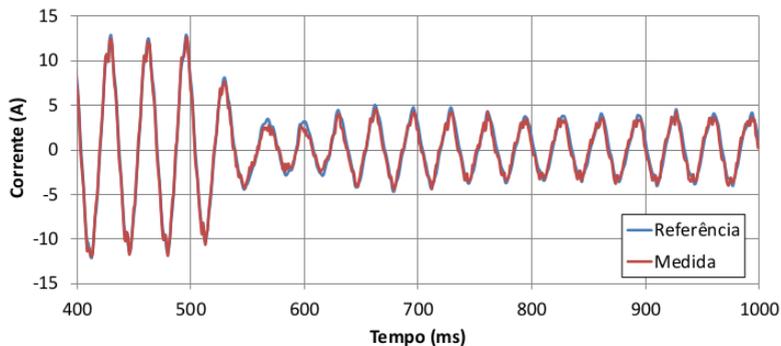


Figura 62 – Controle da corrente  $I_\beta$  em detalhe no início do afundamento.

#### 7.4 AFUNDAMENTO ASSIMÉTRICO

No afundamento instantâneo assimétrico, foi alternada a seqüência de fases nos ensaios, ou seja,

- $V_a = 1,0$  pu,  $V_b = 0,2$  pu e  $V_c = 0,2$  pu;
- $V_a = 0,2$  pu,  $V_b = 1,0$  pu e  $V_c = 0,2$  pu;
- $V_a = 0,2$  pu,  $V_b = 0,2$  pu e  $V_c = 1,0$  pu;

e assim obtendo os mesmos resultados.

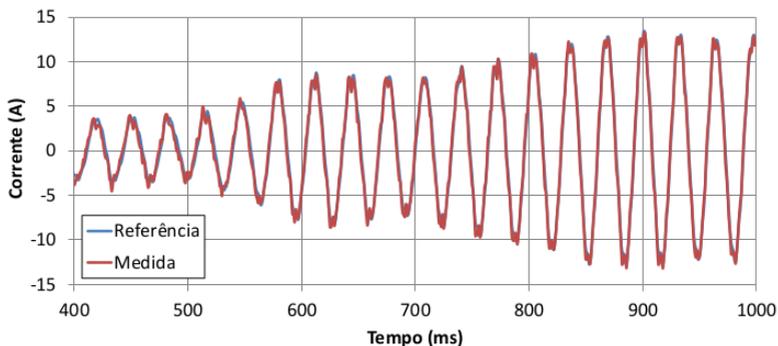


Figura 63 – Controle da corrente  $I_{\beta}$  em detalhe no final do afundamento.

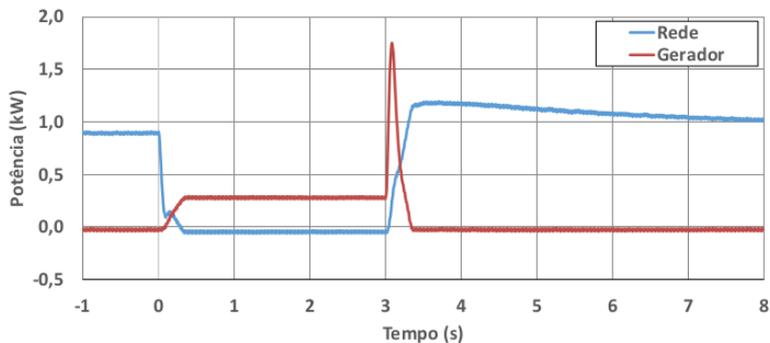


Figura 64 – Comutação entre a potência ativa e reativa.

Optou-se por três condições de afundamento alternando o número de fases que são submetidas ao afundamento:

- $V_a = 1,0$  pu,  $V_b = 1,0$  pu e  $V_c = 0,2$  pu, uma fase;
- $V_a = 1,0$  pu,  $V_b = 0,2$  pu e  $V_c = 0,2$  pu, duas fases;
- $V_a = 0,7$  pu,  $V_b = 0,5$  pu e  $V_c = 0,2$  pu, três fases.

O período de afundamento assimétrico foi escolhido de 1,0 s por ser a pior condição observando a norma brasileira, e desta maneira analisa-se os valores de tensão, corrente e potência na rede. Neste caso não foi apresentada a análise do lado gerador, já que a condição

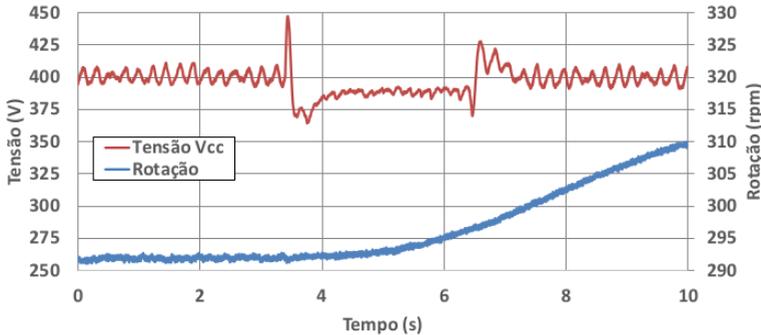


Figura 65 – Tensão  $V_{cc}$  e a rotação.

simétrica analisada na Seção 7.3, impõe a pior situação ao gerador durante o afundamento.

Por uma limitação imposta pelo sensor de medição de  $V_{cc}$ , diminuí a tensão de fase da rede para 115 V, pois instantaneamente a tensão estava ultrapassando os 450 V.

#### 7.4.1 Tensão e corrente nos terminais no afundamento em: (0,2-0,5-0,7)pu

No período inferior a 0,0 s e superior a 1,0 s tem-se a condição nominal, que pode ser observado pela envoltória das três fases na Figura 66.

Entre o período de 0,0 a 1,0 s, ocorre o afundamento com sobreposição das formas de ondas. Já na Figura 67 é extraído um detalhe do início do afundamento, de 60 ms, onde ilustram de forma clara os valores de cada fase.

Na Figura 68 também se apresenta a envoltória da corrente nas três fases. No instante em que ocorre o afundamento da tensão, pode-se verificar que há um aumento das correntes em cada uma das fases, ou seja, o contrário do que ocorreu com a tensão.

Mas neste caso, também há um aumento de cada fase, como ilustra a Figura 69. Cabe ressaltar de que quanto maior for o afundamento da tensão, maior também será a corrente na mesma fase, em outras palavras, pode se observar na Figura 67 que a fase  $V_{ra}$  foi a que sofreu o maior afundamento, conseqüentemente na Figura 69 observa-se o maior valor para corrente da mesma fase  $I_{ra}$ .

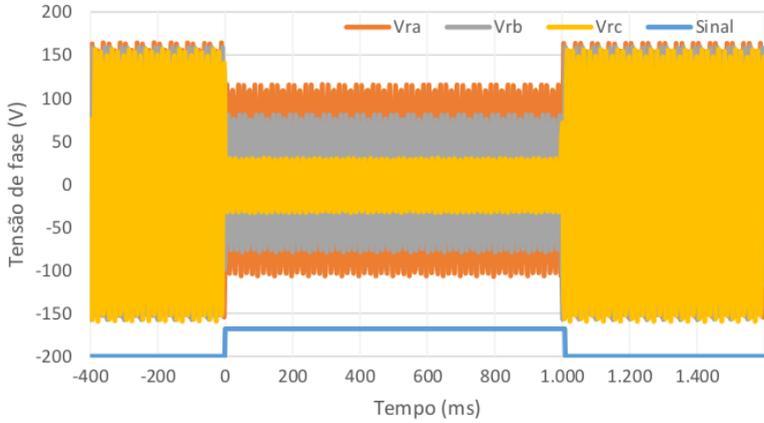


Figura 66 – Tensão instantânea  $V_{abc}$  num afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

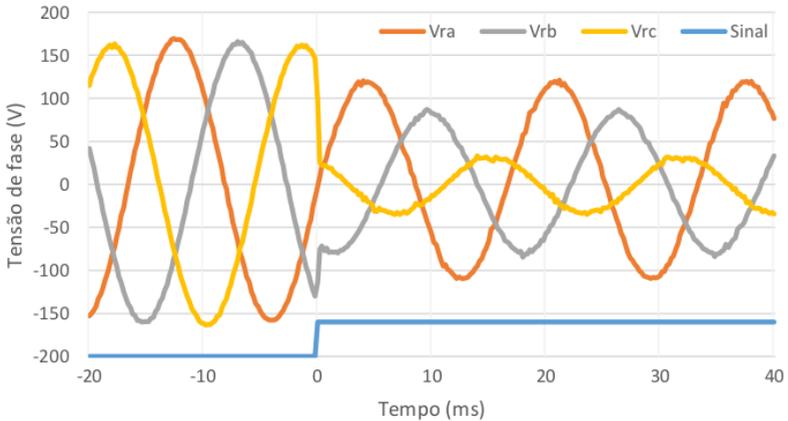


Figura 67 – Tensão instantânea  $V_{abc}$  em detalhes de entrada num afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

A tensão imposta pela fonte se mantém constante por todo o afundamento, conforme é mostrado na Figura 70. Ainda é possível observar que a tensão no barramento CC, sofre pequenas variações, sendo mais significativas no transitório de início e final do afundamento.

No afundamento assimétrico não há comutação de potência ativa

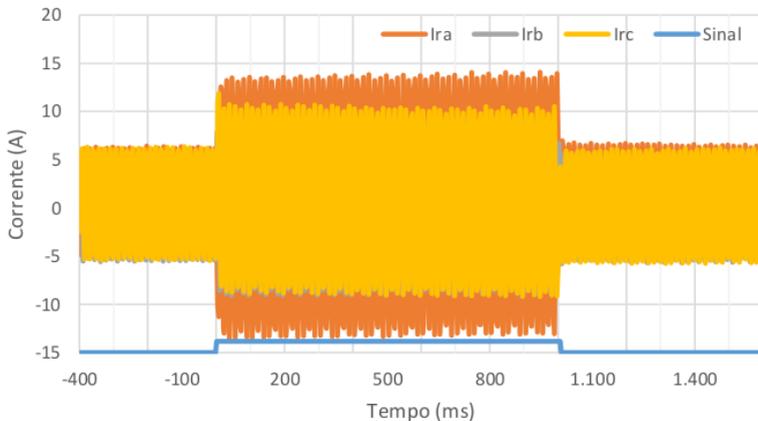


Figura 68 – Corrente instantânea  $I_{abc}$  num afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

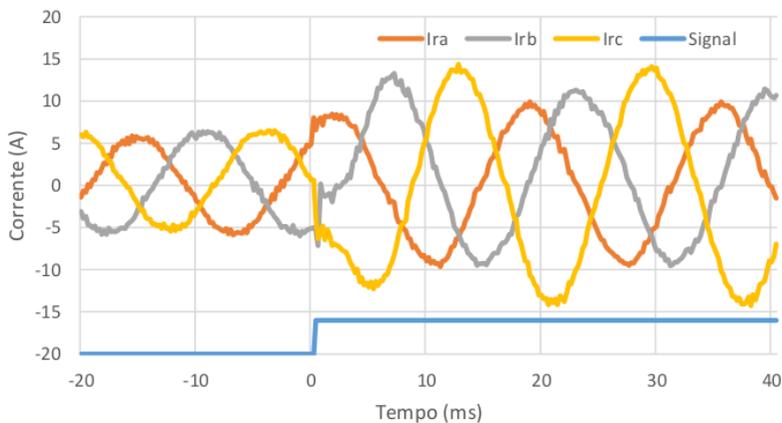


Figura 69 – Corrente instantânea  $I_{abc}$  em detalhes de entrada num afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

com a reativa, contudo durante o afundamento há queda na potência da rede, bem como no gerador e na potência mecânica, com valores pouco significativos nestes dois últimos, conforme pode ser observado na Figura 71.

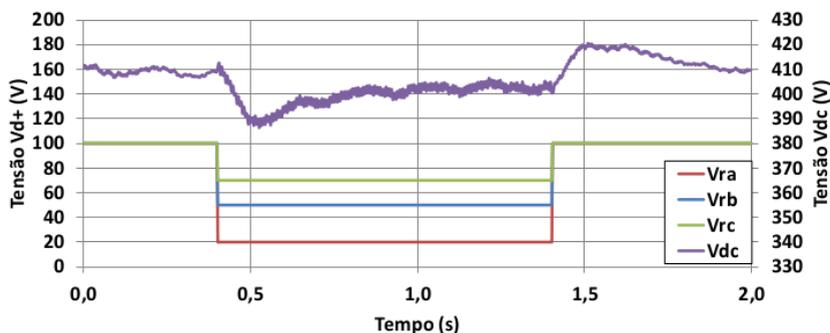


Figura 70 – Tensão  $V_{cc}$  e a tensão eficaz durante todo o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

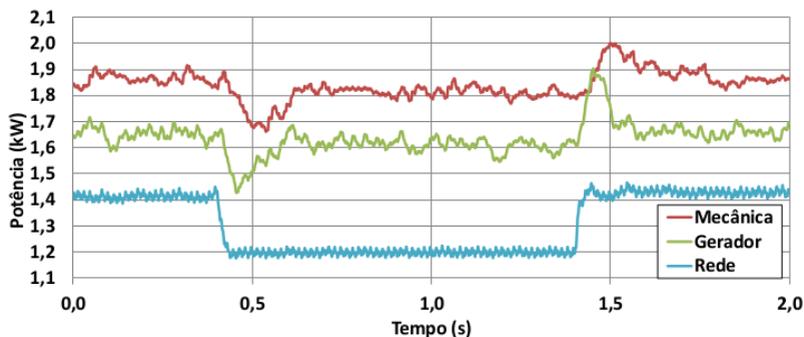


Figura 71 – Potências durante todo o afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

#### 7.4.2 Controle do conversor do lado da rede no afundamento: (0,2-0,5-0,7)pu

Na Figura 72 é mostrado o final de um afundamento em detalhes das correntes de controle medida e de referência de sequência positiva e negativa. No entanto as duas correntes sofrem uma pequena perturbação durante o final do afundamento, seguindo os seus valores de referência num período de aproximadamente 10 ms. A perturbação observada na Figura 73 é significativa no momento que o afundamento é encerrado. Contudo como o intervalo de tempo desta perturbação é

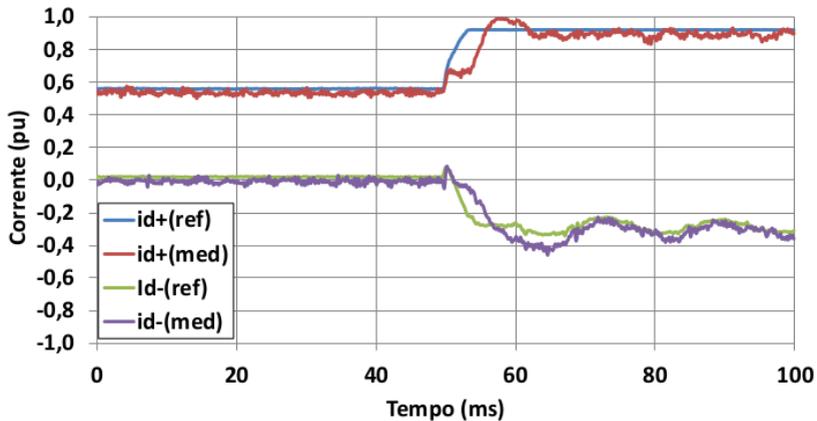


Figura 72 – Detalhe na corrente  $I_d^+$  e  $I_d^-$  medida e de referência no afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

muito curto, na ordem de aproximadamente 10 ms, ele não prejudica o sistema como um todo.

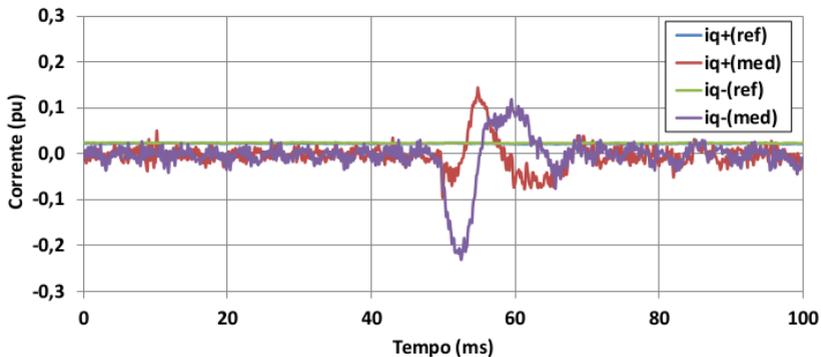


Figura 73 – Detalhe na corrente  $I_q^+$  e  $I_q^-$  medida e de referência no afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

### 7.4.3 Tensões de sequência positiva e negativa nos afundamentos

Nas Figuras 74 a 76 serão apresentadas as tensões do eixo direto, pois o eixo em quadratura ( $V_q$ ) é o eixo de referência tornando o seu valor nulo.

É possível verificar que em todos os afundamentos houve uma queda no valor de  $V_d^+$ , porém no afundamento de uma só fase, conforme mostra a Figura 76,  $V_d^-$  assume um valor positivo, o que não caracteriza nenhum problema pois a sequência negativa pode ser decomposta em módulo positivo ou negativo.

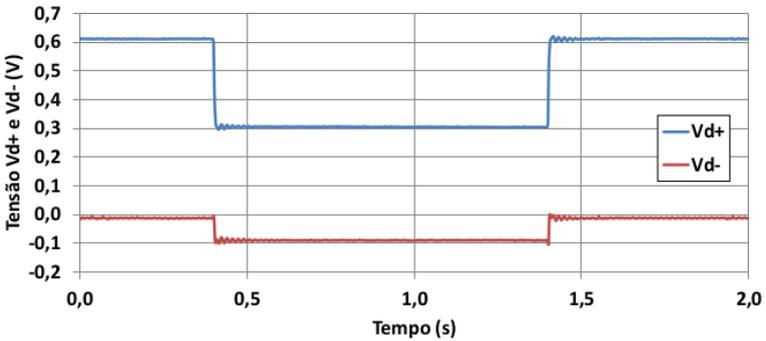


Figura 74 – Tensão  $V_d^+$  e  $V_d^-$  no afundamento (0,2-0,5-0,7)pu.

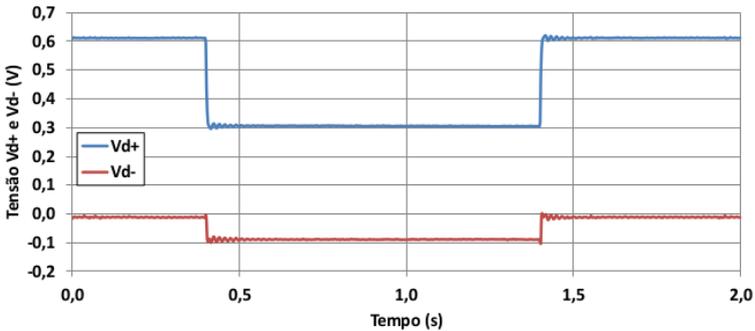


Figura 75 – Tensão  $V_d^+$  e  $V_d^-$  no afundamento (0,2-0,2-1,0)pu.

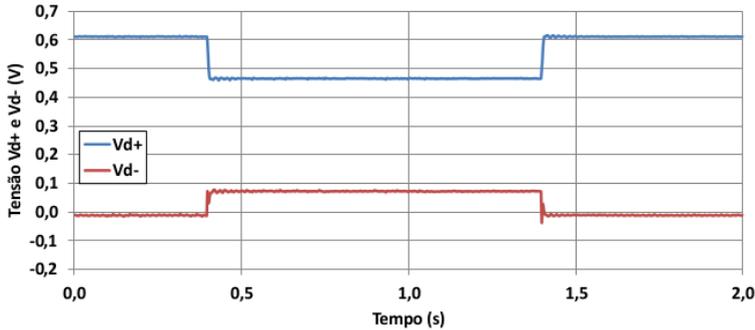


Figura 76 – Tensão  $V_d^+$  e  $V_d^-$  no afundamento (0,2 - 1,0 - 1,0)pu.

## 7.5 RENDIMENTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA

Foram realizados diversos ensaios, com velocidade mínima de vento de 3,5 m/s e máxima de 8,5 m/s. Os registros, que constam na Tabela 3, serviram como base para o cálculo dos rendimentos apresentados na Tabela 4.

Os valores das potências elétricas do gerador e da rede foram medidos com o equipamento Power Analyzer WT 500 da Yokogawa. A Figura 81 do Apêndice A é uma foto da bancada que na sua parte superior aparacem os dois equipamentos sendo que o equipamento do lado esquerdo monitorava as variáveis da rede, enquanto o outro as medições do gerador. Ainda na Figura 82 que é uma foto mais ampla da bancada, também mostra outro Power Analyzer WT 3000 da Yokogawa entre os dois WT 500, para monitorar as variáveis do barramento CC.

## 7.6 DIAGRAMA FINAL DE MONTAGEM DO CLG

A Figura 77 mostra uma visão geral do que foi implementado para o sistema de alimentação do gerador na bancada, contendo os dispositivos tais como: filtros, disjuntores, contatores, sensores e o módulo do conversor com seus mecanismos internos.

O CLG é feito pelo dSPACE, que consiste em processadores de alto desempenho que calculam seus modelos de controlador em tempo

Rotação mecânica (rpm)	Potência mecânica (W)	Potência gerador (W)	Potência elo CC (W)	Potência rede (W)
133	154,6	124,9	104,5	42
151	229,3	192,1	169,4	106
170	327,6	283,5	253,7	186
189	449,3	397,5	360,0	290
208	599,0	532,1	497,4	417
226	776,3	699,2	646,7	572
245	987,8	896,2	840,1	753
264	1238,5	1116,5	1055,5	961
281	1518,4	1371,2	1312,1	1200
299	1844,2	1663,4	1587,9	1470
315	2203,5	1987,1	1899,4	1769
345	3005,9	2660,0	2553,0	2387
350	3148,4	2771,2	2653,3	2488

Tabela 3 – Valores medidos de potência

Rotação (rpm)	Gerador (%)	Conversor do gerador (%)	Conversor da rede (%)	Rendimento geral (%)
133	80,8	83,6	40,2	27
151	83,8	88,2	62,6	46
170	86,5	89,5	73,3	57
189	88,5	90,6	80,6	65
208	88,8	93,5	83,8	70
226	90,1	92,5	88,4	74
245	90,7	93,7	89,6	76
264	90,1	94,5	91,1	78
281	90,3	95,7	91,5	79
299	90,2	95,5	92,6	80
315	90,2	95,6	93,1	80
345	88,5	96,0	93,5	79
350	88,0	95,7	93,8	79

Tabela 4 – Rendimento: geral, dos conversores e do gerador.

real. A conexão com o mundo exterior é estabelecida por uma ampla gama de diferentes interfaces I/O.

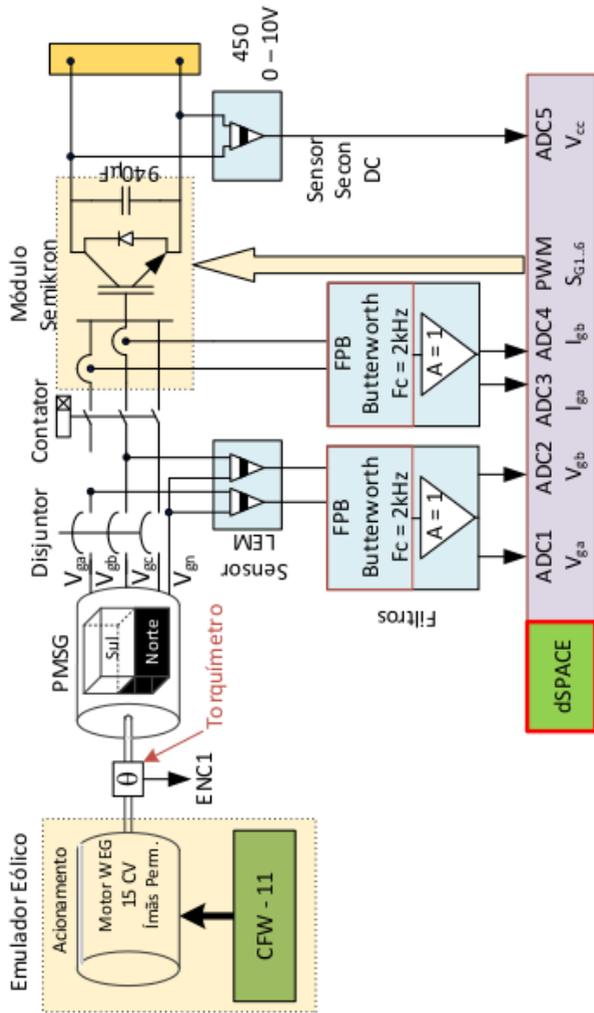


Figura 77 – Representação geral da alimentação no Gerador

## 7.7 DIAGRAMA FINAL DE MONTAGEM DO CLR

A Figura 78 é conectado ao sistema visto na Seção 7.6, completando o sistema fisicamente. Estes dois diagramas são acoplados pelo elo CC, onde encontra-se o capacitor de  $940 \mu F$  de cada um dos módulos dos inversores, ou seja, o acoplamento do módulo do gerador com o módulo da rede.

O CLR é feito por um DSP. O DSP é uma evolução do microcontrolador, com maior poder de processamento, incorporando os recursos dos microcontroladores e fornecendo novas funções, desenvolvido para suportar tarefas numéricas intensivas, de alto desempenho e repetitivas.

Outros dispositivos tais como: filtros, disjuntores, contadores, sensores e o módulo do conversor também fazem parte deste sistema.

## 7.8 CONCLUSÃO GERAL

Um novo sistema de controle de um gerador com ímãs permanentes com forma de onda de FEM trapezoidal foi proposto baseado na teoria  $pq$ , ou teoria das potências ativa e reativa instantâneas, conectado à rede de energia elétrica, apto a operar em regime permanente e que também atendesse as condições de falhas simétricas e assimétricas.

Ao contrário do que é proposto por diversos estudos, ao invés de se utilizar o controle de tensão no elo CC como parâmetro de referência do CCLR, optou-se em fazer o controle deste parâmetro pelo CCLG.

Mas, a fim de garantir que o sistema opere em níveis seguros de tensão e corrente, a potência da rede é realimentada no CCLG. A queda de potência da rede devido a uma falha causa uma variação na potência do gerador e conseqüentemente a velocidade varia. Como consequência, ocorre aumento instantâneo da tensão no barramento CC, enquanto o controle busca novamente operar no ponto ótimo.

No CCLR fez-se uso do MPPT. Toda vez que ocorre uma variação de velocidade da turbina, o controle de transferência de potência para a rede irá se ajustar a estas novas condições fazendo com que a turbina opere no ponto de máxima potência para cada velocidade do vento. Ainda no CCLR, o circuito DPLL de sincronização com a rede mostrou-se eficiente mesmo durante os afundamentos de tensão.

Devido ao conteúdo harmônico apresentado pelas tensões nos terminais do gerador devido ao chaveamento, foi necessário utilizar a FEM para realizar o controle  $pq$ . Um método de reconstrução contínua da FEM foi utilizado baseado na forma de onda obtida na etapa de

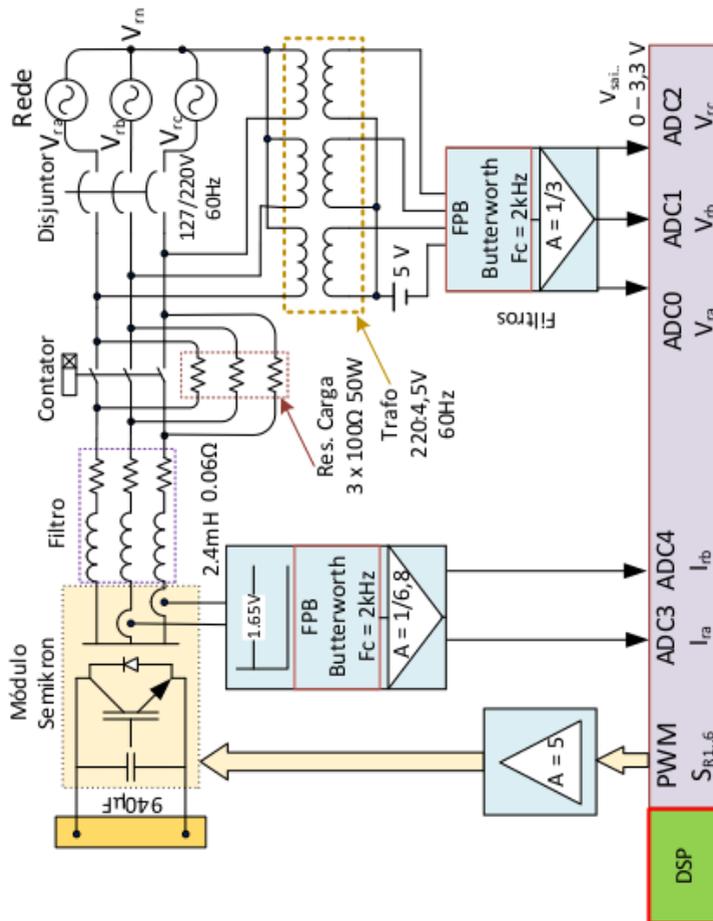


Figura 78 – Representação geral do sistema de alimentação da rede

projeto do gerador ou pela forma de onda de tensão a vazio do gerador obtida em ensaio. Uma das vantagens do sistema de controle proposto é a sua simplicidade diante dos sistemas de controle baseados na transformada de Park ( $dq$ ), um número menor de PI's são necessários e evita-se o cálculo de funções senoidais da posição do rotor.

Os resultados de simulação e experimentais apresentados comprovam a eficácia do sistema de controle proposto mesmo diante de um degrau de velocidade de vento e nas condições de curto-circuito

simétrico e assimétrico. Observou-se que a tensão no elo CC foi mantida em níveis seguro, e em todas as condições não teve uma elevação maior do que 11%.

O sistema de controle desenvolvido mostrou-se eficiente dispensando a adoção de circuitos adicionais de limitação de tensão do capacitor no elo CC, tais como resistores de descargas.

## 7.9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver o sistema enfocando a otimização, para minimizar as perdas;
- Construir todo o sistema fazendo uso de apenas um dispositivo digital, preferencialmente DSP pois o custo é bem menor em relação ao DSpace;
- Aplicar a teoria pq nos dois conversores e verificar o comportamento frente ao afundamento assimétrico.



## REFERÊNCIAS

AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. New Jersey, USA: A John Wiley & Sons, Inc., 2007.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: Energia eólica. 2003. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia\\_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf). Acessado em 13 fev. 2015.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: Banco de informação da geração. 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acessado em 02 fev. 2015.

BOLLEN, M. H. J. *Understanding power quality problems*. 1 ed. ed. New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press, 2000.

BOSE, B. K. *Modern power electronics and AC drivers*. 1 ed. ed. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall PTR, 2002.

CERNE - Centro de Estratégias em Recursos Naturais e Energia: Submódulo 3.6 - requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica. Set. 2013. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/danielfxa1/cartilha-elica-cerne-2014>. Acessado em 13 fev. 2015.

CHATTOPADHYAY S.AND MITRA, M.; SENGUPTA, S. *Electric Power Quality*. 2011th. ed. India: Springer, 2011.

CHINCHILLA, M.; ARNALTES, S.; BURGOS, J. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 1, p. 130–135, March 2006.

GHOSH, A.; LEDWICH, G. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*. [S.l.]: Springer, 2002.

GONG, X.; YANG, X.; QIAO, W. Wind speed and rotor position sensorless control for direct-drive pmg wind turbines. In: *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. Houston, TX: IEEE, 2010. p. 1–8.

GRAUERS, A. *Design of direct-driven Permanent-magnet generators for wind turbines*. Tese (Doutorado) — Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1996.

GRENIER, D. et al. A park-like transformation for the study and the control of a nonsinusoidal brushless dc motor. In: *Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, IEEE IECON 21st International Conference on*. Orlando, FL: IEEE, 1995. v. 2, p. 836–843.

HEIER, S. *Grid integration of wind energy conversion systems*. 2 nd. ed. New York, USA: John Wiley & Sons LTDA, 1998.

IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Std 1159*, 1995.

IOV, F. et al. *Mapping of grid faults and grid codes*. 1 ed.. ed. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 2007.

KANDEEPAN, S.; REISENFELD, S. Acquisition performance of a digital phase locked loop with a four-quadrant arctan phase detector. In: *Intelligent Signal Processing and Communication Systems, ISPACS. International Symposium on*. Australia: IEEE, 2004. p. 648–653.

KIM, K.-H. et al. Robust control of pmsg wind turbine systems with back-to-back pwm converters. In: *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2010 2nd IEEE International Symposium on*. China: IEEE, 2010. p. 433–437.

KIM, K.-H. et al. LVRT scheme of pmsg wind power systems based on feedback linearization. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, v. 27, n. 5, p. 2376–2384, May 2012.

KINDERMANN, G. *Curto-circuito*. 2<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D. *Analysis of electric machinery and drive systems*. second edition. Danvers, Brasil: IEEE Press, 2002.

LIDOZZI, A. et al. Vector control of trapezoidal back-emf pm machines using pseudo-park transformation. In: *Power Electronics Specialists Conference. PESC. IEEE*. Rhodes: IEEE, 2008. p. 2167–2171.

MIRANDA, P. L. K. de. *Controle de geradores de ímãs permanentes com tensão trapezoidal aplicado em aerogeradores sob condições de afundamento de tensão da rede elétrica: Falhas simétricas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2014.

NAGAI, B. M.; AMEKU, K.; ROY, J. N. Performance of a 3 kw wind turbine generator with variable pitch control system. *Applied Energy*, v. 86, n. 9, p. 1774–1782, 2009. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261908003358>>.

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 3 ed.. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Prentice Hall do Brasil, 1982.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico: Submódulo 3.6 - requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica. ago. 2009. Disponível em: [http://www.ons.com.br/download/procedimentos/modulos/Modulo\\_3/Submodulo%203.6\\_Rev\\_1.0.pdf](http://www.ons.com.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_3/Submodulo%203.6_Rev_1.0.pdf). Acessado em 04 fev. 2015.

PARK, R. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, v. 48, n. 3, p. 716–727, July 1929.

SONG, H.-S.; NAM, K. Dual current control scheme for pwm converter under unbalanced input voltage conditions. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 46, n. 5, p. 953–959, Oct 1999.

SOUZA, F. P. de. *Correção do fator de potencia para instalações de baixa potência empregando filtros ativos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

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

WATANABE, E.; STEPHAN, R.; AREDES, M. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 8, n. 2, p. 697–703, Apr 1993.



## **APÊNDICE A – Fotos da bancada**



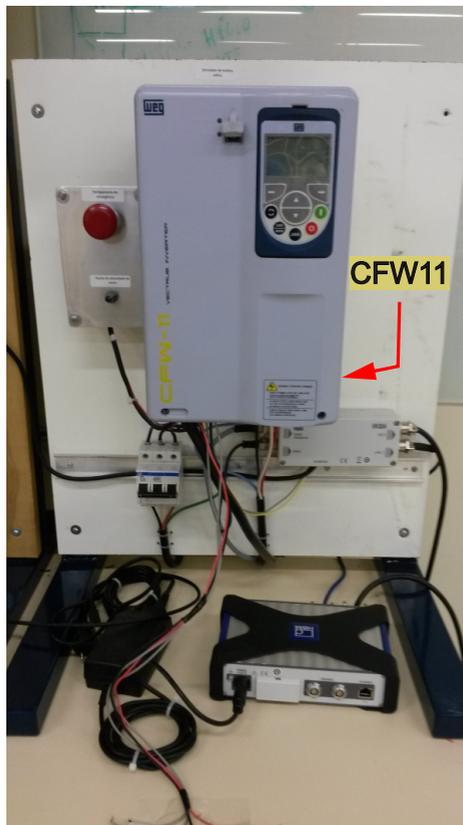


Figura 79 – Foto do simulador eólico.

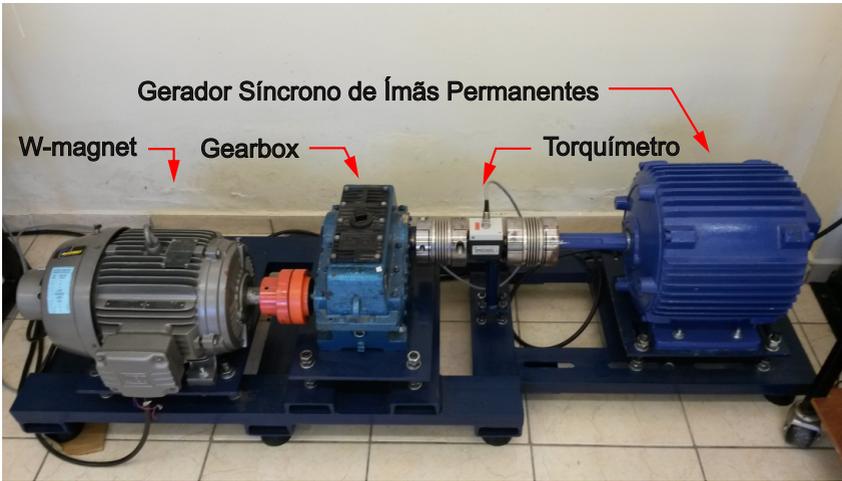


Figura 80 – Foto da bancada do motor e gerador

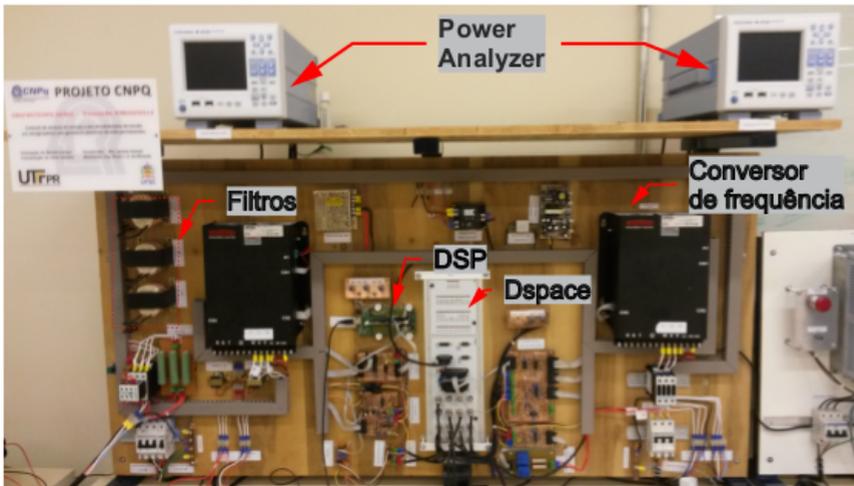


Figura 81 – Painel de controle DSpace e DSP.



Figura 82 – Foto geral da bancada.



Figura 83 – Foto geral da bancada vista lateral.



## **APÊNDICE B - Parâmetros do sistema**



Potência	<b>3 kW</b>
Densidade do ar	<b>1,2 Kg/m<sup>3</sup></b>
Raio da pá	<b>2 m</b>
Máximo coeficiente de conversão de pot.	<b>0,48</b>
$\lambda_{oti}$	<b>8,1</b>
Velocidade de corte inferior/superior	<b>3,5 – 8,5 m/s</b>
Inércia	<b>12 Kg.m<sup>2</sup></b>

Tabela 5 – Parâmetros da turbina

Potência nominal do gerador	<b>3 kW</b>
Fluxo	<b>1,143 Wb</b>
Coeficiente de atrito	<b>0,0001 N.m.s</b>
Momento de inércia	<b>0,02 Kg.m<sup>2</sup></b>
Resistência do estator por fase	<b>0,6 <math>\Omega</math></b>
Indutância do estator por fase	<b>17,6 mH</b>
Número de polos	<b>12</b>
Tensão eficaz do gerador (vazio - 350 rpm)	<b>106,01 V</b>
Frequência da tensão do gerador (350 rpm)	<b>35 Hz</b>
Frequência chaveamento SVPWM	<b>10 kHz</b>
Resistência dos IGBT's	<b>530 m<math>\Omega</math></b>
Tempo de amostragem de controle	<b>90 <math>\mu</math>s</b>

Tabela 6 – Parâmetros do conjunto conversor e gerador.

Tensão	<b>380 V</b>
Frequência	<b>60 Hz</b>
Resistência do filtro na fase A	<b>88 m<math>\Omega</math></b>
Indutância do filtro na fase A	<b>2,60 mH</b>
Resistência do filtro na fase B	<b>80 m<math>\Omega</math></b>
Indutância do filtro na fase B	<b>2,53 mH</b>
Resistência do filtro na fase C	<b>81 m<math>\Omega</math></b>
Indutância do filtro na fase C	<b>2,45 mH</b>
Frequência chaveamento SV-PWM	<b>16 kHz</b>
Tempo de amostragem de controle	<b>70 <math>\mu</math>s</b>

Tabela 7 – Parâmetros do conjunto conversor, rede e filtro.

Tensão no elo CC	<b>400 V</b>
Capacitância	<b>2 * 900 <math>\mu F</math></b>

Tabela 8 – Parâmetros do elo CC

## ANEXO A - Teorema de Fortescue



## A.1 TEOREMA DE FORTESCUE

Fortescue, através do teorema intitulado de “Método de componentes simétricas aplicado a solução de circuitos polifásicos”, estabeleceu que um sistema de “n” fasores desequilibrados, pode ser decomposto em “n” sistemas de fasores equilibrados, denominadas componentes simétricas dos fasores originais. Mas como o sistema elétrico adotado internacionalmente é o trifásico, far-se-á uma análise do teorema aplicado ao sistema trifásico.

O teorema de Fortescue, aplicado à redes trifásicas, como mostrado na Figura 84, fica assim formulado: “Um sistema trifásico de três fasores desbalanceados pode ser decomposto em três sistemas trifásicos de três fasores balanceados chamados de componentes simétricas de seqüência positiva, negativa e zero” (KINDERMANN, 1997).

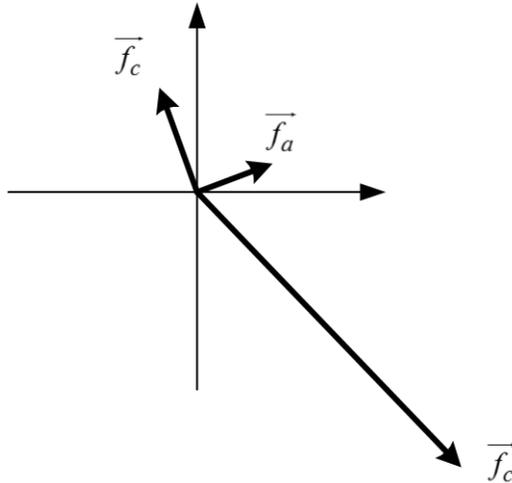


Figura 84 – Sistema de modelo assimétrico

### A.1.1 Sistema de seqüência positiva

Sistema trifásico simétrico é um conjunto de três fasores balanceados, ou seja, de mesmo módulo, defasados entre si de  $120^{\circ}$  com a mesma seqüência de fase do sistema assimétrico original desbalanceado.

A notação é expresso por índice  $+$ . O sistema trifásico tem seus fasores (abc) girando na mesma velocidade síncrona do sistema original. Conforme Figura 85.

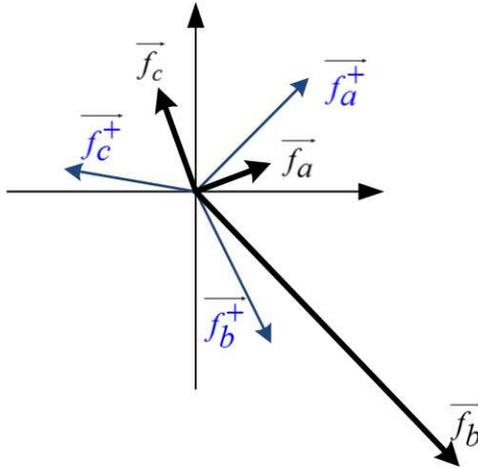


Figura 85 – Sistema de sequência positiva

### A.1.2 Sistema de sequência negativa

Sistema trifásico simétrico é um conjunto de três fasores balanceados, girando numa sequência contrária a do sistema original desbalanceado. A notação é expresso por índice  $-$ . O sistema trifásico tem seus fasores (**abc**) girando no sentido contrário a velocidade síncrona do sistema original. Conforme Figura 86.

### A.1.3 Sistema de sequência zero

Sistema de três fasores iguais em módulo e em fase no tempo, girando na mesma sequência do sistema original desbalanceado, isto é, da sequência positiva. A notação  $o$  representa a sequência zero. Conforme é mostrado na Figura 87.

Com a soma dos três sistema, das Figuras 85 a 87, pode se obter o sistema original, conforme figura 84. Estes sistema pode ser equacionado como segue:

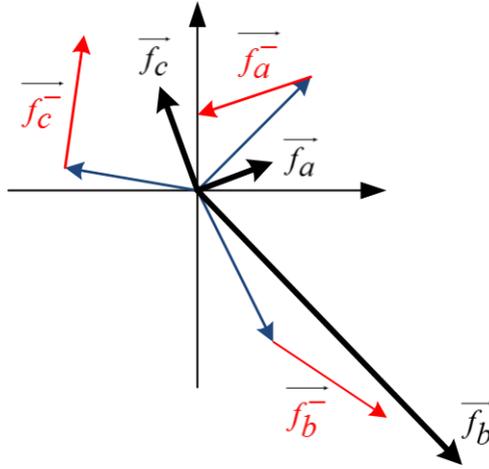


Figura 86 – Sistema de sequência negativa

#### A.1.4 Expressão analítica do teorema

Conforme já foi dito, um sistema trifásico desequilibrado é composto por três sistemas trifásicos equilibrados de sequência zero, positiva e negativa. Portanto, fazendo a superposição dos três sistemas equilibrados, obtém-se:

$$\vec{f}_a = \vec{f}_a^0 + \vec{f}_a^+ + \vec{f}_a^- \quad (\text{A.1})$$

$$\vec{f}_b = \vec{f}_b^0 + \vec{f}_b^+ + \vec{f}_b^- \quad (\text{A.2})$$

$$\vec{f}_c = \vec{f}_c^0 + \vec{f}_c^+ + \vec{f}_c^- \quad (\text{A.3})$$

##### A.1.4.1 Operador $\vec{a}$

Para facilitar, pode se escrever qualquer sistema trifásico simétrico relacionando uns com os outros com o emprego do operador  $\vec{a}$ .  $\vec{a}$  é um vetor unitário  $120^\circ$  adiantado em relação ao eixo de referência, e  $\vec{a}^2$  é um vetor unitário adiantado  $240^\circ$  em relação ao eixo de referência. O operador  $\vec{a}$ , aplicado a qualquer vetor, gira-o por  $120^\circ$  no sentido positivo ou anti-horário.

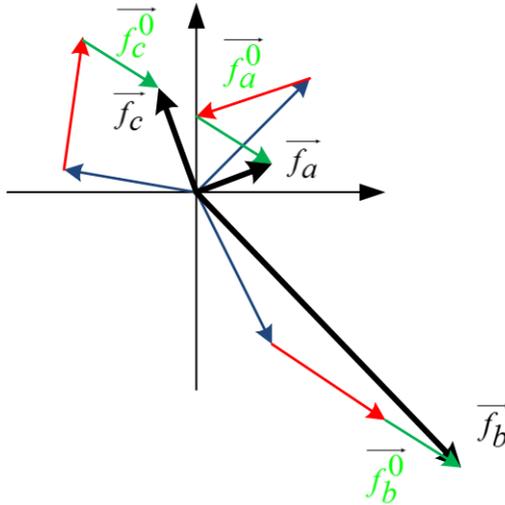


Figura 87 – Sistema de sequência zero

$$\vec{a} = 1\angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{A.4})$$

$$\vec{a}^2 = 1\angle 240^\circ = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{A.5})$$

Equação geral:

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_a \\ \vec{f}_b \\ \vec{f}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{f}_a^0 & \vec{f}_a^+ & \vec{f}_a^- \\ \vec{f}_b^0 & \vec{f}_b^+ & \vec{f}_b^- \\ \vec{f}_c^0 & \vec{f}_c^+ & \vec{f}_c^- \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

Referência:  $\vec{f}_a$

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_a \\ \vec{f}_b \\ \vec{f}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{f}_a^0 & \vec{f}_a^+ & \vec{f}_a^- \\ \vec{f}_a^0 & \vec{a}^2 \vec{f}_a^+ & \vec{a} \vec{f}_a^- \\ \vec{f}_a^0 & \vec{a} \vec{f}_a^+ & \vec{a}^2 \vec{f}_a^- \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

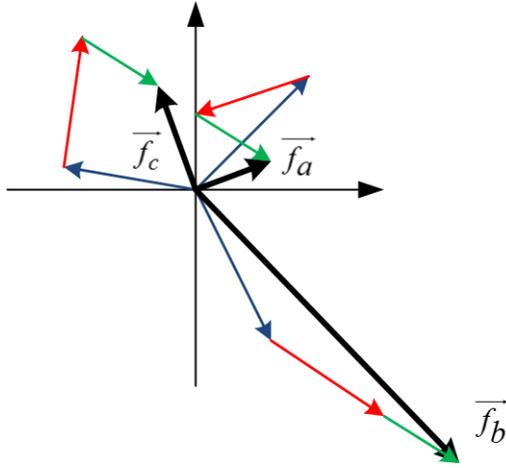


Figura 88 – Sistema de sequência composto

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_a \\ \vec{f}_b \\ \vec{f}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & \vec{a} \\ 1 & \vec{a} & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{f}_a^0 \\ \vec{f}_a^+ \\ \vec{f}_a^- \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & \vec{a} \\ 1 & \vec{a} & a^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_{abc} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \vec{f}_{a0+-} \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_{a0+-} \end{bmatrix} = [A^{-1}] \begin{bmatrix} \vec{f}_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_a^0 \\ \vec{f}_a^+ \\ \vec{f}_a^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & \vec{a} \\ 1 & \vec{a} & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{f}_a \\ \vec{f}_b \\ \vec{f}_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

$$\vec{f}_a^{\circ} = \frac{1}{3} \left( \vec{f}_a + \vec{f}_b + \vec{f}_c \right) \quad (\text{A.13})$$

$$\vec{f}_a^{\rightarrow} = \frac{1}{3} \left( \vec{f}_a + \vec{a}\vec{f}_b + \vec{a}^2\vec{f}_c \right) \quad (\text{A.14})$$

$$\vec{f}_a^{\leftarrow} = \frac{1}{3} \left( \vec{f}_a + \vec{a}^2\vec{f}_b + \vec{a}\vec{f}_c \right) \quad (\text{A.15})$$

Desta forma a análise de seqüência positiva, pode ser representada de forma matricial, como:

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_a^{\rightarrow} \\ \vec{f}_b^{\rightarrow} \\ \vec{f}_c^{\rightarrow} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \left( \vec{f}_a - \frac{\vec{f}_b}{2} - \frac{\vec{f}_c}{2} \right) + \vec{j} \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \vec{f}_b - \vec{f}_c \right) \\ \left( \vec{f}_b - \frac{\vec{f}_c}{2} - \frac{\vec{f}_a}{2} \right) + \vec{j} \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \vec{f}_c - \vec{f}_a \right) \\ \left( \vec{f}_c - \frac{\vec{f}_a}{2} - \frac{\vec{f}_b}{2} \right) + \vec{j} \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \vec{f}_a - \vec{f}_b \right) \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

Expandindo, a mesma análise para a seqüência negativa, pode se representar o resultado em uma forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \vec{f}_a^{\leftarrow} \\ \vec{f}_b^{\leftarrow} \\ \vec{f}_c^{\leftarrow} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \left( \vec{f}_a - \frac{\vec{f}_b}{2} - \frac{\vec{f}_c}{2} \right) + \vec{j} \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \vec{f}_c - \vec{f}_b \right) \\ \left( \vec{f}_b - \frac{\vec{f}_c}{2} - \frac{\vec{f}_a}{2} \right) + \vec{j} \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \vec{f}_a - \vec{f}_c \right) \\ \left( \vec{f}_c - \frac{\vec{f}_a}{2} - \frac{\vec{f}_b}{2} \right) + \vec{j} \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \vec{f}_b - \vec{f}_a \right) \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

Como nesta tese o elemento neutro do lado da rede e do gerador, servem apenas como referência, não há a necessidade do desenvolvimento da seqüência zero.