



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

ADELSON MENEZES LIMA

**APLICAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE ÓTIMO
EM SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA CONECTADO À
REDE ELÉTRICA**

**MOSSORÓ – RN
2014**

ADELSON MENEZES LIMA

**APLICAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE ÓTIMO
EM SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA CONECTADO À
REDE ELÉTRICA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação – PPGSCA, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn
– UFERSA

Co-orientador: Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto
– UFC

**MOSSORÓ – RN
2014**

O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência**

L732a Lima, Adelson Menezes.

Aplicação da estratégia de controle ótimo em sistemas de geração eólica conectado à rede elétrica / Adelson Menezes Lima. -- Mossoró, 2014.

112f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn. Co-orientador: Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto.

Dissertação (Mestrado em Ambiente, Tecnologia e sociedade) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação.

1. Energia eólica. 2. Controle ótimo. 3. Conversor de potência. 4. Energia eólica. 5. Qualidade de energia. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT/780-14

CDD: 621.312136

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba
CRB-15/452

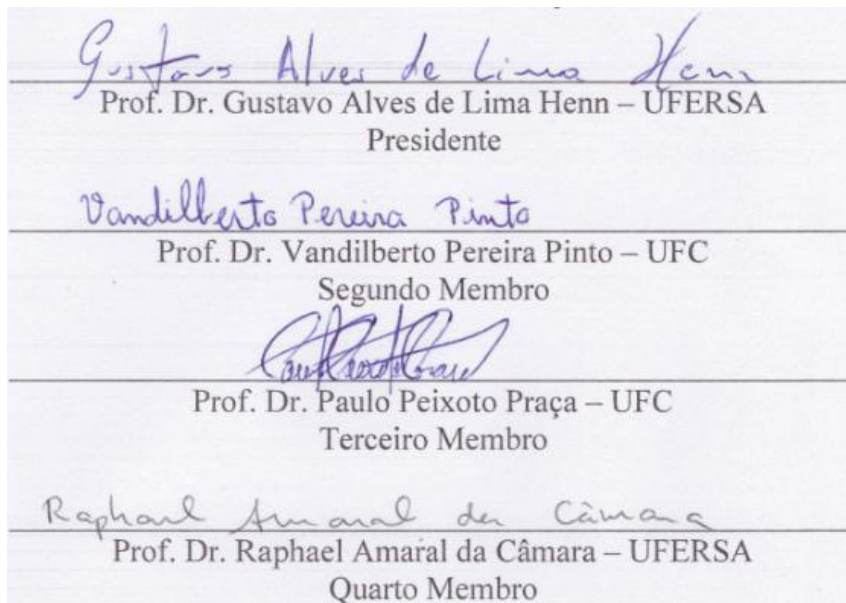
ADELSON MENEZES LIMA

**APLICAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE ÓTIMO
EM SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA CONECTADO À
REDE ELÉTRICA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação – PPGSCA, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

APROVADA EM: 30 / 07 / 2014.

BANCA EXAMINADORA



Mossoró, 30 de Julho de 2014.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha irmã
(*in memoriam*), Suzane.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por iluminar meus caminhos.

Aos meus pais Almir e Ivete, pois sempre me apoiaram em minhas em minhas decisões e mesmo distantes sempre passaram forças, pois entenderam que era fundamental para a minha vida profissional. Aos meus irmãos Suzane (*in memoriam*), Fernando, Helder, e a minha sobrinha e irmã Paula, por sempre me incentivarem.

À minha companheira Náthalee Cavalcanti, por sempre estar ao meu lado, pelas alegrias compartilhadas, companheirismo e paciência.

Aos professores e orientadores Prof. D. Sc. Gustavo Alves de Lima Henn e Prof. D. Sc. Vandilberto Pereira Pinto pelas orientações, ensinamentos, compreensão, paciência, confiança, sempre serei grato. A todos os professores do curso de Engenharia de Energia da UFERSA que me apoiaram e incentivaram, contribuindo para que esse momento fosse concretizado, desde a minha chegada à UFERSA com a recepção do Prof. Idalmir, ao Prof. Victor que me hospedou no período que precisei estar em Fortaleza.

Aos Professores da UFC, Prof. D. Sc. Paulo Praça e Prof. D. Sc. Tobias Rafael e ao aluno de doutorado Davi Joca pelas discussões e contribuições no trabalho, nos momentos que precisei estar na UFC.

Aos amigos que caminharam juntos nesta jornada, Luciano Júnior, Kléber Barros e Pablo Thiago.

Aos amigos, colegas, professores e funcionários do PPGSCA/CITED, que fizeram e aos que fazem parte do LASIC, Laboratório de Telecomunicações Microondas, GEDEA, pois conseguiram tornar os nossos dias mais alegres e até mesmo contribuindo de alguma forma no trabalho.

EPÍGRAFE

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”
(Albert Einstein)

RESUMO

As energias renováveis tem sido fundamentais na geração de energia, dentre elas a energia eólica desperta uma grande atenção, pois é uma fonte renovável com grande parte na conexão com o sistema elétrico de potência. Esta conexão tem proporcionado várias problemas ao sistema elétrico, devido aos conversores eletrônicos, variação do vento, tipo de máquinas. Com o objetivo de aliviar estes problemas, são avaliados os controladores híbrido (PI + LQR) e os controladores ótimos (LQR) nos conversores conectados à rede elétrica. Para a avaliação dos controladores foram desenvolvidos modelos matemáticos a fim de realizar e validar as simulações com o auxílio do *software* PSIM[®], do fabricante *Powersim Inc.* versão 9.1. Os resultados obtidos permitem concluir que o controlador híbrido e ótimo tiveram um bom desempenho quando comparados com um controlador tipo clássico (PI).

Palavras-Chave: Energia Eólica, Controle Ótimo, Qualidade da Energia Elétrica, Conversores de frequência.

ABSTRACT

Renewable energy has been essential in power generation, among them, the wind energy arouses great attention because it is a renewable source with largely in connection with the electric power system. This connection has provided several problems to the electrical system due to electronic converters, wind variation, type of machinery. In order to reduce these problems, hybrid controllers(PI+LQR) and optimal controllers(LQR) in the inverters connected to the grid are evaluated. For the evaluation of controllers were developed mathematical models in order to perform and validate the simulations with PSIM software, the manufacturer Powersim Inc. version 9.1. The results indicate that the hybrid and optimal controllers achieved good performances when compared with a conventional type controller (PI).

Keywords: Wind Power, Optimal Control, Power Quality, Power Converters.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xviii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	20
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
1.2 OBJETIVOS.....	28
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	28
CAPÍTULO 2 - AEROGERADORES E QUALIDADE DA ENERGIA	29
2.1 AEROGERADORES.....	29
2.2 TURBINA EÓLICA	32
2.3 RETIFICADOR	35
2.4 CONVERSOR BOOST	40
2.4.1 Dimensionamento do Indutor, Capacitor e Resistor	41
2.5 INVERSOR.....	42
2.6 QUALIDADE DA ENERGIA	43
2.6.1 Suportabilidade e Afundamentos de Tensão	47
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
CAPÍTULO 3 - MODELAGEM E CONTROLE DO SISTEMA	49
3.1 MALHA DE CORRENTE DO CONVERSOR <i>BOOST</i> - MPPT	49
3.1.1 Modulação Por Largura de Pulso (PWM)	50
3.2 CONVERSOR DO LADO DA REDE (CLR)	51
3.3 CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE.....	53
3.3.1 Controlador PI	53
3.3.2 Projeto das Malhas de Corrente	54
3.3.3 Projeto da Malha de Tensão	58

3.3.4 Controlador Híbrido (PI + LQR)	61
3.3.5 Controlador LQR	64
3.4 MÉTODO DO SINCRONISMO.....	66
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
4.1 RESULTADOS EM REGIME PERMANENTE	68
4.2 REGIME TRANSITÓRIO	74
4.2.1 MPPT	74
4.2.2 Variação da Velocidade do Vento	76
4.2.2.1 Controlador PI	76
4.2.2.2 Controlador Híbrido (PI + LQR)	80
4.2.2.3 Controlador LQR.....	83
4.2.3 Afundamento da Rede Monofásica	86
4.2.3.1 Controlador PI	87
4.2.3.2 Controlador Híbrido (PI + LQR)	89
4.2.3.3 Controlador LQR	90
4.2.4 Afundamento da Rede Trifásica	92
4.2.4.1 Controlador PI	92
4.2.4.2 Controlador Híbrido (PI + LQR)	94
4.2.4.3 Controlador LQR	95
4.2.5 Desbalanceamento da Rede Trifásica	97
4.2.5.1 Controlador PI	97
4.2.5.2 Controlador Híbrido (PI + LQR)	98
4.2.5.3 Controlador LQR -	99
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Números do setor.....	22
Tabela 2 - Parâmetros para o conversor <i>boost</i>	41
Tabela 3 - Distúrbios causados por turbinas eólicas.....	44
Tabela 4 - Requisitos técnicos gerais.....	46
Tabela 5 - Tipos de VTCD em afundamentos de tensão	48
Tabela 6 - Valores de vento, potência, tensão, corrente simulada e corrente calculada	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Moinho do tipo “holandês”	21
Figura 2 - Evolução da geração eólica no Brasil.....	22
Figura 3 - Capacidade eólica global instalada anual no mundo	22
Figura 4 - As dez maiores capacidades instaladas em 2013	23
Figura 5 - Diagramas de blocos do sistema de controle	24
Figura 6 - Diagrama proposto de 6MVA	24
Figura 7 - Esquema da estratégia de controle do conversor do lado da rede	25
Figura 8 - Controle do inversor reduzido a quatro chaves.....	26
Figura 9 - Esquema de controle par regular o fluxo de potência	27
Figura 10 - Diagrama de blocos do controle vetorial do lado da rede	27
Figura 11 - Sistema de geração eólica.....	29
Figura 12 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal.....	30
Figura 13 - Gerador de indução duplamente alimentado (DFIG).....	31
Figura 14 - Gerador síncrono a imã permanente (GSIP)	31
Figura 15 - Gerador síncrono de rotor bobinado (WRSG)	31
Figura 16 - Modelo teórico de Betz.....	33
Figura 17 - Curva C_p em função Modelo teórico de λ e β	34
Figura 18 - Sistema de conversão baseado em retificador a diodo tipo VSC.....	36
Figura 19 - Sistema de conversão baseado em retificador a diodo tipo CSC.....	36
Figura 20 - Sistema de conversão baseado em retificador a diodo tipo <i>boost</i>	36
Figura 21 - Sistema de conversão baseado no conversor <i>back-to-back</i> de dois níveis ..	37
Figura 22 - Sistema de conversão baseado no conversor <i>back-to-back</i> de dois níveis com redução do número de partes do conversor.....	37
Figura 23 - Sistema de conversão baseado em conversor multinível.....	38
Figura 24 - Sistema baseado no retificador semi-controlado – conversor <i>boost</i>	38
Figura 25 - Sistema de conversão baseado no conversor matriz	39
Figura 26 - Chaves bidirecionais usadas em um conversor matriz.....	39
Figura 27 - Retificador trifásico de onda completa não controlado.....	39
Figura 28 - Gerador conectado ao retificador trifásico de onda completa não controlado	40

Figura 29 - Circuito do conversor boost	40
Figura 30 - Tensão sobre o indutor	42
Figura 31 - Sistemas de conexão com à rede elétrica (a) Sistema solar (b) Sistema eólico da Enercon.....	43
Figura 32 - Tensão nos terminais dos aerogeradores.....	47
Figura 33 - Malha de controle da corrente no conversor <i>boost</i>	49
Figura 344 - Comparação da corrente de referência, medida e erro.	50
Figura 35 - Geração de pulsos PWM	50
Figura 36 - Inversor com IGBT.....	51
Figura 377 - Sistema de controle do conversor do lado da rede	53
Figura 388 - Sistema de controle para as correntes I_d e I_q	55
Figura 39 - Gráfico <i>Root Locus</i>	57
Figura 40 - Controle de corrente	58
Figura 41 - Malha de controle de corrente e tensão	59
Figura 42 - Malha de tensão simplificada.....	59
Figura 43 - Gráfico <i>Root Locus</i>	60
Figura 44 - Controle da tensão	61
Figura 45 - Diagrama de blocos do controle PI + LQR.....	61
Figura 46 - Diagrama de blocos do controlador LQR	64
Figura 47 - Sentido das correntes no barramento CC.....	64
Figura 48 - Circuito <i>p</i> -PLL.....	66
Figura 49 - Circuito <i>q</i> -PLL.....	66
Figura 50 - Forma de onda da tensão de entrada do retificador trifásico.	68
Figura 51 - Forma de onda da corrente no diodo do retificador trifásico.	69
Figura 52 - Forma de onda da tensão CC de saída do retificador.	69
Figura 53 - Forma de onda da corrente no indutor do conversor boost.....	70
Figura 54 - Forma de onda da tensão na chave à IGBT de alta frequência.....	70
Figura 55 - Forma de onda da corrente na chave à IGBT de alta frequência.	70
Figura 56 - Forma de onda da tensão no diodo do conversor boost.....	71
Figura 57 - Forma de onda da corrente no diodo do conversor boost	71
Figura 58 - Forma de onda da tensão no barramento CC	72
Figura 59 - Forma de onda da tensão na chave à IGBT do inversor	72
Figura 60 - Forma de onda da corrente na chave à IGBT do inversor	72
Figura 61 - Tensões de saída do inversor.....	73

Figura 62 - Forma de onda da tensão e a corrente injetada na rede elétrica.....	73
Figura 63 - Variação da velocidade do vento.....	74
Figura 64 - Forma de onda da tensão de entrada e da corrente no indutor do conversor <i>boost</i>	75
Figura 65 - Tensão no barramento CC sobre variações do vento.....	76
Figura 66 - Forma de onda da tensão no barramento CC	77
Figura 67 - Forma de onda das correntes de saída do inversor.....	77
Figura 68 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	77
Figura 69 - Forma de onda da tensão no barramento CC	78
Figura 70 - Forma de onda das correntes de saída do inversor.....	78
Figura 71 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	78
Figura 72 - Forma de onda da tensão no barramento CC	79
Figura 73 - Forma de onda das correntes de saída do inversor.....	79
Figura 74 - Forma de onda da tensão e corrente de saída (multiplicada por 4)	80
Figura 75 - Forma de onda da tensão no barramento CC	80
Figura 76 - Forma de onda das correntes de saída.....	80
Figura 77 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	81
Figura 78 - Forma de onda da tensão no barramento CC	81
Figura 79 - Forma de onda das correntes de saída.....	82
Figura 80 - Forma de onda da tensão e corrente de saída (multiplicada por 2)	82
Figura 81 - Forma de onda da tensão no barramento CC	82
Figura 82 - Forma de onda das correntes de saída.....	83
Figura 83 - Forma de onda da tensão e corrente de saída (multiplicada por 4)	83
Figura 84 - Forma de onda da tensão da tensão no barramento CC	83
Figura 86 - Foma de onda das correntes de saída	84
Figura 86 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	84
Figura 87 - Forma de onda da tensão do barramento CC	84
Figura 88 - Forma de onda das correntes de saída.....	85
Figura 89 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	85
Figura 90 - Forma de onda da tensão de entrada do conversor boost.....	85
Figura 91 - Forma de onda das correntes de saída.....	86
Figura 92 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	86
Figura 93 - Forma de onda da tensão no barramento CC	87
Figura 94 - Forma de onda da corrente de saída.....	87

Figura 95 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	88
Figura 96 - Forma de onda da tensão no barramento CC.	88
Figura 97 - Forma de onda da corrente de saída.....	89
Figura 98 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	89
Figura 100 - Forma de onda da corrente de saída.....	90
Figura 101 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.	90
Figura 102 - Forma de onda da tensão no barramento CC	91
Figura 103 - Forma de onda da corrente de saída.....	91
Figura 104 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	91
Figura 105 - Forma de onda da tensão no barramento CC	92
Figura 106 - Forma de onda da corrente de saída.	93
Figura 107 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	93
Figura 108 - Forma de onda da tensão no barramento CC	93
Figura 109 - Forma de onda da corrente de saída.....	94
Figura 110 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.	94
Figura 111 - Forma de onda da tensão no barramento CC	95
Figura 112 - Forma de onda da corrente de saída.....	95
Figura 113 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	95
Figura 114 - Forma de onda da tensão no barramento CC	96
Figura 115 - Forma de onda da corrente de saída.	96
Figura 116 - Forma de onda da tensão e corrente de saída	96
Figura 117 - Forma de onda da tensão no barramento CC	97
Figura 118 - Forma de onda da corrente de saída.....	98
Figura 119 - Forma de onda da tensão e corrente.	98
Figura 120 - Forma de onda da tensão no barramento CC	99
Figura 121 - Forma de onda da corrente de saída.....	99
Figura 122 - Forma de onda da tensão e corrente.	99

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A.C.	Antes de Cristo
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C	Capacitor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLR	Conversor do Lado da Rede
CO ₂	Dióxido de Carbono
C_p	Coefficiente de Potência
CSC	<i>Current Source Converters</i>
C_T	Coefficiente do Torque
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
d	Ganho estático
D	Razão Cíclica
DFIG	Gerador de Indução Duplamente Alimentado
EPE	Empresa de Pesquisa Enegetica
F _s	Frequência de Chaveamento
GSIP	Gerador Síncrono a Imã Permanente
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
Hp	Horse Power
Hz	Frequência
i_d	Corrente de Eixo Direto
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>

I_i	Corrente de entrada
I_o	Corrente de saída
i_q	Corrente de Eixo em Quadratura
K_I	Ganho Integral
K_P	Ganho Proporcional
L	Indutor
LQR	Regulador Linear Quadrático
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PI	Proporcional e Integral
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
P_m	Potência Mecânica
P_o	Potência Nominal
p -PLL	Potência instantânea ativa
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
PSIM	<i>Power Electronic Simulation</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
q -PLL	Potência instantânea reativa
R	Resistor
RB-IGBT	<i>Reverse Blocking</i>
s	Variável complexa da transformada de Laplace
SIN	Sistema Interligado Nacional
T	Chave a IGBT do conversor Boost
t_{off}	Tempo de fechamento
t_{on}	Tempo de Abertura
T_s	Período

V	Tensão
V_i	Tensão de Entrada
V_L	Tensão no Indutor
V_o	Tensão de Saída
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
WRSG	<i>Wound Rotor Synchronous Generator</i>
ΔI_L	Ondulação de Corrente
ΔV_{bar}	Ondulação de Tensão

Capítulo 1 - Introdução

As energias renováveis são um dos mais importantes assuntos em discussão sobre o futuro da humanidade, pois são aquelas cujas fontes não se esgotam, ou seja, se renovam. O sol, por exemplo, não irá deixar de brilhar, bem como o vento pode ser usado por aerogeradores sem que se esgote. Dentre as energias renováveis (água, sol, vento, biomassa), a geração eólica tem tido um crescente aumento na geração de energia no mundo (GWEC, 2014). O consumo mundial de energia primária proveniente de fontes não renováveis (petróleo, carvão, gás natural, e nuclear) vem causando uma preocupação permanente com esgotamento destas fontes (EPE, 2014), que tem acarretado na emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, causador do efeito estufa.

A energia eólica é uma energia proveniente do aquecimento não uniforme do planeta pelos raios solares e pelo movimento de rotação da terra. Tais fenômenos causam a movimentação das massas de ar, dando origem aos ventos (PAVINATTO, 2005). A sua utilização teve origem desde os primórdios na realização de trabalhos das civilizações, como também no uso das embarcações (TIBOLA, 2009). Outro registro foi na agricultura, quando necessitava cada vez mais de ferramentas que ajudassem em tarefas, como na moagem de grãos e bombeamento de água, desta forma, isso possibilitou vantagens à substituição do esforço humano e animal, a partir destas aplicações, foram construídos os cata-ventos.

O registro através de cata-ventos é proveniente da antiga Pérsia, por volta de 200 A.C., e hoje chamada oficialmente República Islâmica do Irã, sendo tipo de eixo vertical que veio a se espalhar e sendo utilizados por vários séculos (DUTRA, 2008).

Na Europa os cata-ventos persistiram até o século XII quando começaram a ser utilizados modelos de eixo horizontal. Os cata-ventos de eixo horizontal do tipo “holandês” foram rapidamente disseminados em vários países da Europa como apresenta a figura 1. Com o desenvolvimento tecnológico das pás, sistema de controle, eixos e etc, o uso dos cata-ventos de 50 Hp, propiciou a utilização durante os séculos XII a XIX em grande escala (DUTRA, 2008).

Um grande avanço da energia eólica na Europa se deu com a Revolução Industrial no final do Século XIX. Com o surgimento da máquina a vapor, iniciou-se o

declínio no uso da energia eólica na Holanda. A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte, e após a guerra, o petróleo e grandes usinas se tornaram extremamente competitivos economicamente, e os aerogeradores foram construídos apenas para fins de pesquisa (DUTRA, 2008).



Figura 1 - Moinho do tipo “holandês”

Fonte: Adaptado de Tibola, 2009.

Apesar do avanço dos aerogeradores em pesquisa, somente na década de 1970 com a crise mundial do petróleo, ocorreram esforços considerados representativos na retomada de investimentos e pesquisas na área. No Brasil não existem registros ou estudos que revelam dados sobre o uso de cata-ventos no país até este período, as pesquisas para o uso dos ventos como fonte de energia elétrica começaram tarde demais, quando comparadas com as experiências internacionais. Dentre os primeiros estudos visando o domínio da tecnologia eólica merecem destaque no ano de 1976 nos laboratórios do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), como resposta à crise do petróleo foram desenvolvidos protótipos de pequena potência de 1 a 2 KW (CARVALHO, 2003).

No Brasil, somente em meados da década de 1990 começaram a ocorrer encontros visando à discussão sobre os rumos da energia eólica (CARVALHO, 2003). Hoje, conforme a ABEEólica (Associação Brasileira de Energia Eólica) e a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) o Brasil dispõe dos seguintes dados, como apresenta a tabela 1 e a figura 2.

Tabela 1 - Números do setor

Usinas instaladas no Brasil	181
Capacidade instalada (GW)	4,5
Redução de CO ₂ (T/ano)	3.858.813

Fonte: Adaptado de ABEEólica, 2014.

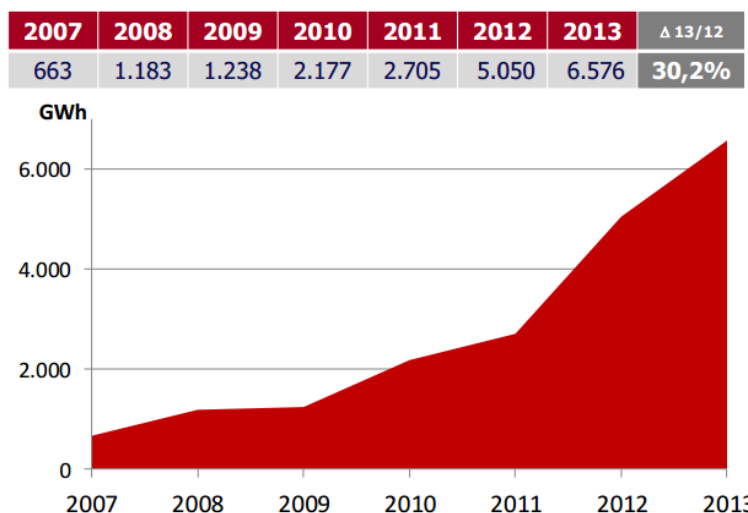


Figura 2 - Evolução da geração eólica no Brasil

Fonte: Adaptado de EPE, 2014.

De acordo com o GWEC (*Global Wind Energy Council*) a geração eólica no mundo tem a capacidade instalada conforme a figura 1.1, e a sua distribuição entre os dez maiores países em capacidades instaladas, como ilustra a figura 3.

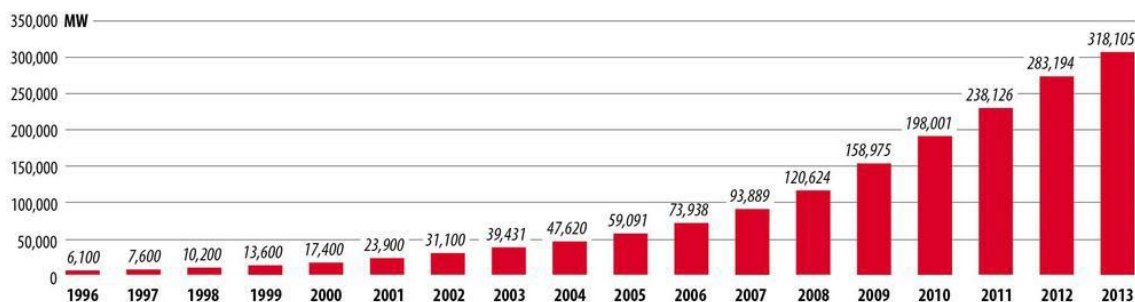


Figura 3 - Capacidade eólica global instalada anual no mundo

Fonte: Adaptado de GWEC, 2014.

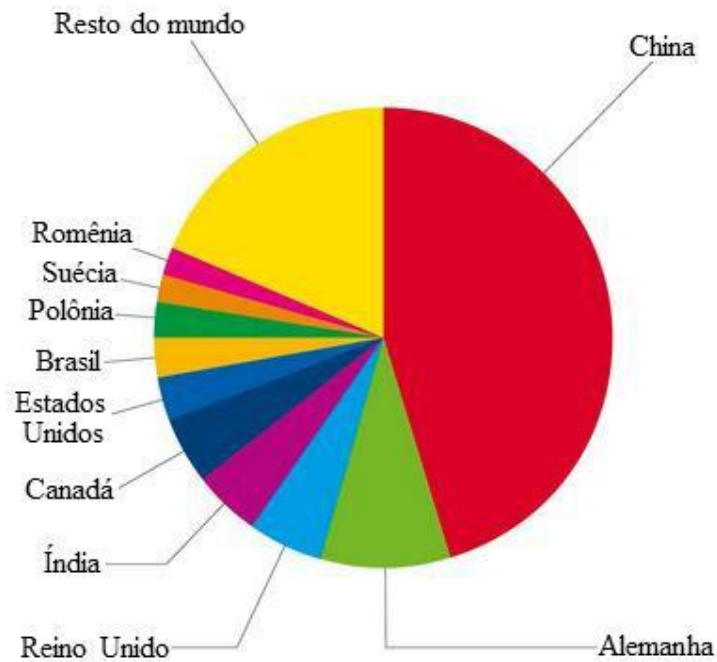


Figura 4 - As dez maiores capacidades instaladas em 2013

Fonte: Adaptado de GWEC, 2014.

1.1 Revisão Bibliográfica

Para uma melhor compreensão da conexão do sistema eólico com a rede elétrica, será apresentada uma breve revisão bibliográfica dos tipos de controle associados às topologias de eletrônica de potência quando conectados à rede elétrica.

Muitas técnicas de controle são utilizadas em sistema de geração eólica, que vai desde o controle do vento, através do controle das pás (*pitch*), até a interligação deste sistema com a rede elétrica. Com o uso da eletrônica de potência, diversas topologias são associadas com o controle a fim de obter um melhor processamento e aproveitamento desta energia.

De acordo com (SONG, 2003) é realizado um controle para um sistema de 30 kW, que consiste em controlar o barramento CC através das correntes I_d e I_q . A potência ativa é controlada pela corrente de eixo q e potência reativa pelo eixo d , conforme a figura 5.

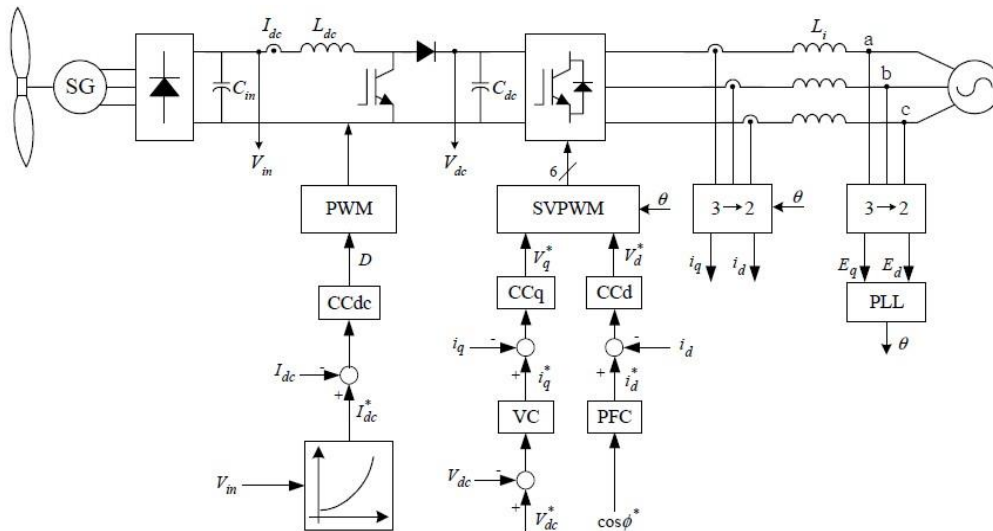


Figura 5 - Diagramas de blocos do sistema de controle

Fonte: Adaptado de SONG, 2003.

Em (MOUSSA, 2011) é proposto um sistema de acionamento direto via gerador síncrono para uma turbina eólica de 6MVA. No lado do gerador, o conversor trifásico mantém o barramento CC constante. Por outro lado, o conversor trifásico do lado da rede utiliza a estratégia de controle vetorial que atua controlando o gerador o qual opera a uma velocidade ótima do rotor para obter a energia máxima do vento, a energia gerada alimenta a rede ajustando a quantidade de potência ativa e reativa entregue à rede. Tanto a tensão no barramento CC como as correntes dq do lado da rede é controlada pelo PI. A figura 6 demonstra este sistema.

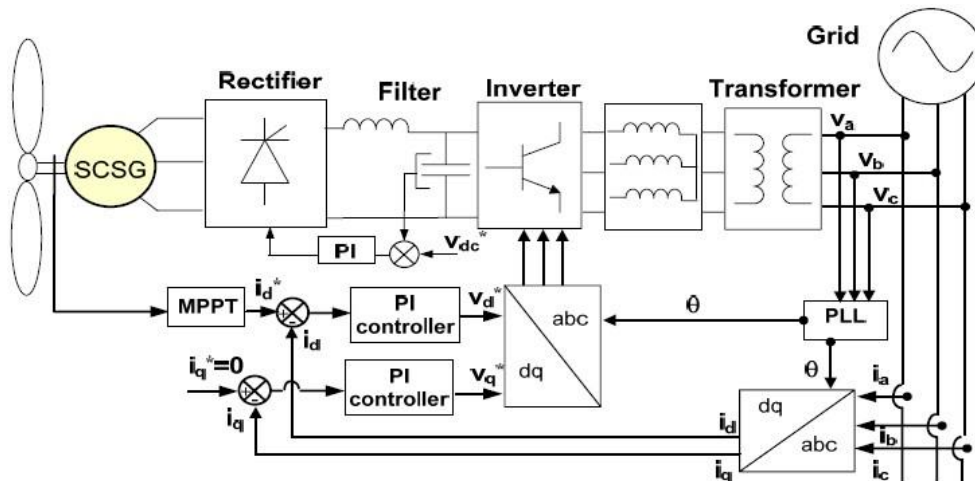


Figura 6 - Diagrama proposto de 6MVA

Fonte: Adaptado de MOUSSA, 2011.

Segundo (MAHERSI, 2013) é proposto uma simulação dinâmica para um gerador síncrono a ímã permanente (GSIP) no sistema de conversão de energia eólica de velocidade variável. O sistema é controlado por duas estratégias de controle, onde o conversor do lado da rede é usado para controlar o barramento com uma tensão CC constante, com isso regular a potência fornecida à rede elétrica, como mostra figura 7.

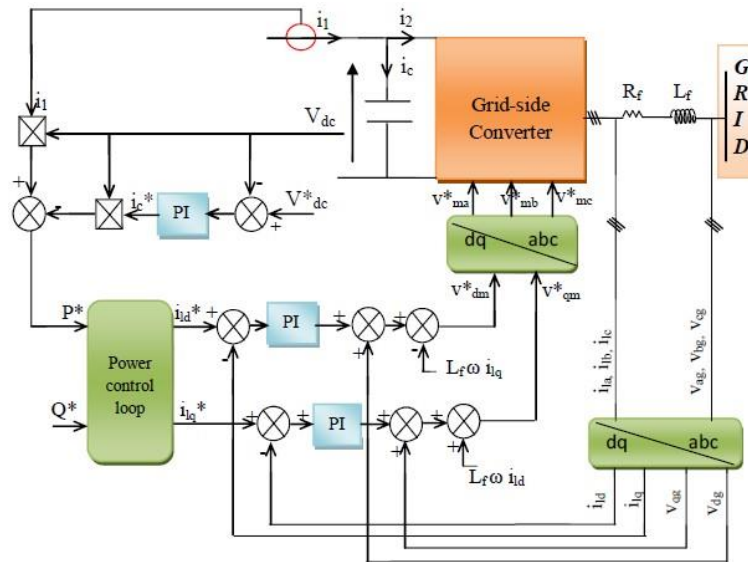


Figura 7 - Esquema da estratégia de controle do conversor do lado da rede

Fonte: Adaptado de MAHERSI, 2013.

Em (AHMED, 2013) é proposto um sistema de conversores e chaveamentos reduzidos de quatro semicondutores (apenas dois braços) conectados à rede, e que consiste em um ponto central, conforme a figura 8. O ponto central do barramento CC é considerado como a referência, neste caso a frequência de comutação do inversor a quatro chaves é um pouco mais elevada do que a de seis chaves. O princípio de controle no inversor a PWM é que e_a e e_b são tensões reduzidas e obtidas a partir de V_a e V_b que são multiplicadas pelo controle externo do PI (Proporcional e Integral) do barramento CC para formar as correntes de referência.

Já em (RAJERDAN, 2013) é demonstrado um esquema de controle em um conversor matriz com objetivo de rastrear e extrair máxima potência do sistema eólico e transferir o mesmo para carga. O esquema de controle para regular o fluxo de energia está representado na figura 9. As tensões de saída, v_a , v_b , v_c são controlados por orientação de vetores (do inglês *Oriented Vector Control*) por suas magnitudes e mudança de fase da alimentação para atender o fluxo necessário de potências ativas e reativas.

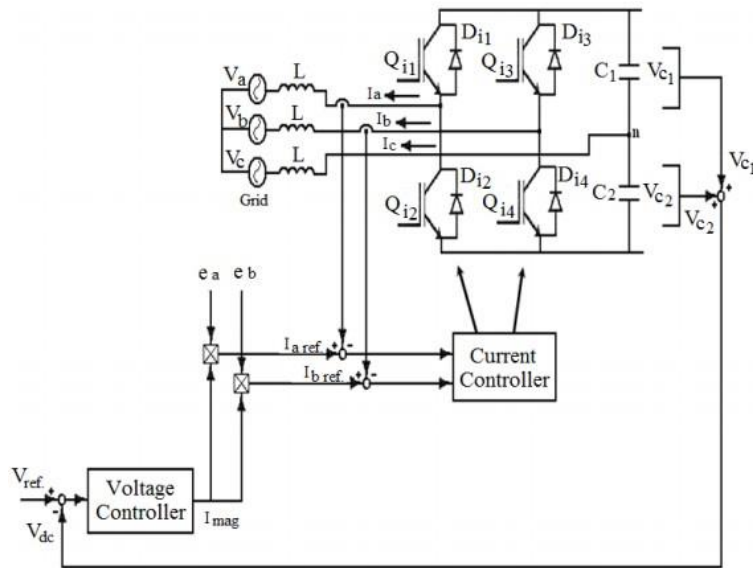


Figura 8 - Controle do inversor reduzido a quatro chaves

Fonte: Adaptado de AHMED, 2013.

Por fim em (PATI, 2014) também é realizado um controle no conversor do lado da rede por orientação de vetores para tensão através de um conversor *back-to-back*. Este esquema de controle vetorial mantém o barramento CC em um valor constante e emprega controladores PI, com isso melhora o fator de potência. A figura 10 ilustra o sistema proposto.

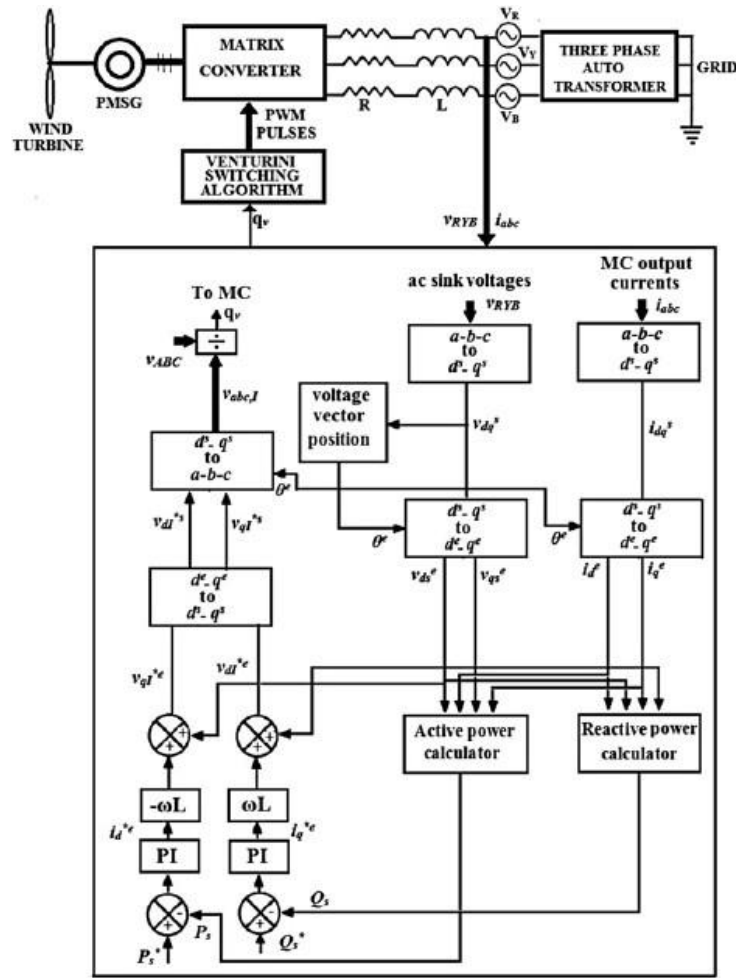


Figura 9 - Esquema de controle par regular o fluxo de potência

Fonte: Adaptado de RAJENDRAN, 2014.

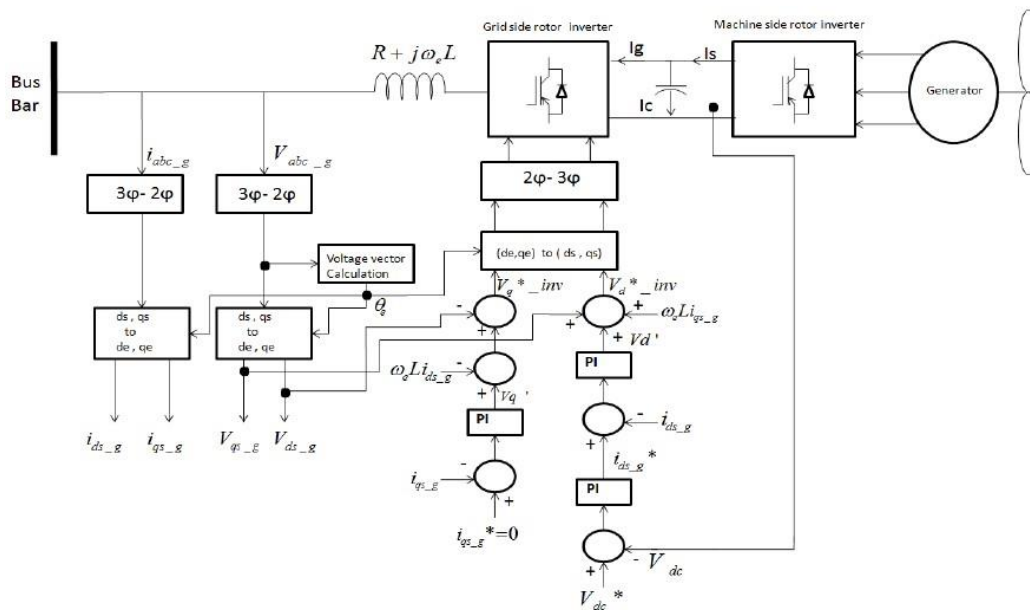


Figura 10 - Diagrama de blocos do controle vetorial do lado da rede

Fonte: Adaptado de PATI, 2014.

1.2 Objetivos

O objetivo central deste trabalho é estudar a estratégia de controle LQR (Regulador Linear Quadrático) com ação integral aplicada ao controle do conversor conectado do lado da rede elétrica.

Como objetivos específicos, cita-se:

- Analisar em regime permanente o retificador, conversor *boost* e o inversor conectado à rede, quando a velocidade do vento for constante;
- Utilizar uma estratégia de controle clássica (PI), um sistema híbrido (PI + LQR) e somente uma estratégia de controle LQR (controle ótimo com ação integral) no conversor do lado da rede;
- Por fim analisar o desempenho dos controladores do lado da rede para um regime transitório diante da variação de velocidade do vento, afundamento de tensão (monofásico, trifásico) e desbalanceamento da rede elétrica;

1.3 Estrutura do trabalho

A partir do Capítulo 1 o presente trabalho divide-se em cinco capítulos, organizados de forma a garantir uma sequência de informação ao leitor.

O Capítulo 2 apresenta o sistema eólico e as principais tecnologias de aerogeradores, como também as partes deste sistema. Também são demonstrados os problemas de qualidade da energia por sistemas eólicos conectados à rede elétrica.

O Capítulo 3 descreve a modelagem e controle dos sistemas de controladores PI, híbrido (PI + LQR) e LQR utilizados no conversor do lado da rede elétrica.

O Capítulo 4 apresenta os resultados das simulações para os controladores PI, híbridos (PI+LQR) e LQR.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões dos resultados obtidos e trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Aerogeradores e Qualidade da Energia

Neste capítulo apresenta-se o aerogerador, suas partes e as principais máquinas utilizadas. Além disso, uma breve explanação sobre os conversores CA/CC (retificador), CC/CC (*boost*), CC/CA (inversor). Também serão apresentados as topologias mais utilizadas do retificador, e o dimensionamento do conversor CC/CC, como também os problemas de qualidade da energia em conexão com a rede elétrica.

2.1 Aerogeradores

Os aerogeradores são sistemas responsáveis pela conversão da energia cinética contida nos ventos em energia elétrica, disponibilizando-a para a rede elétrica em seus terminais. A figura 11 apresenta o sistema eólico e seu processo de transformação até à rede elétrica.

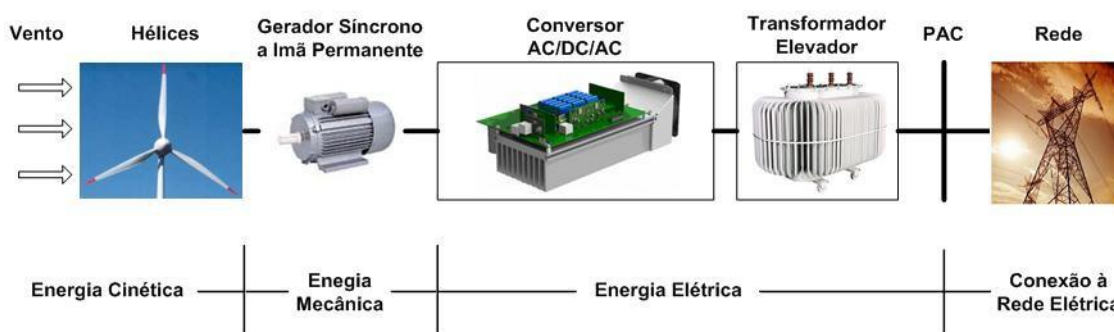


Figura 11 - Sistema de geração eólica

Fonte: Autoria Própria, 2014.

A figura 12 demonstrar as principais partes de uma turbina eólica de eixo horizontal. Estas turbinas são diferenciadas pelo tamanho e formato da nacele, a presença ou não de uma caixa multiplicadora e o tipo de gerador utilizado.

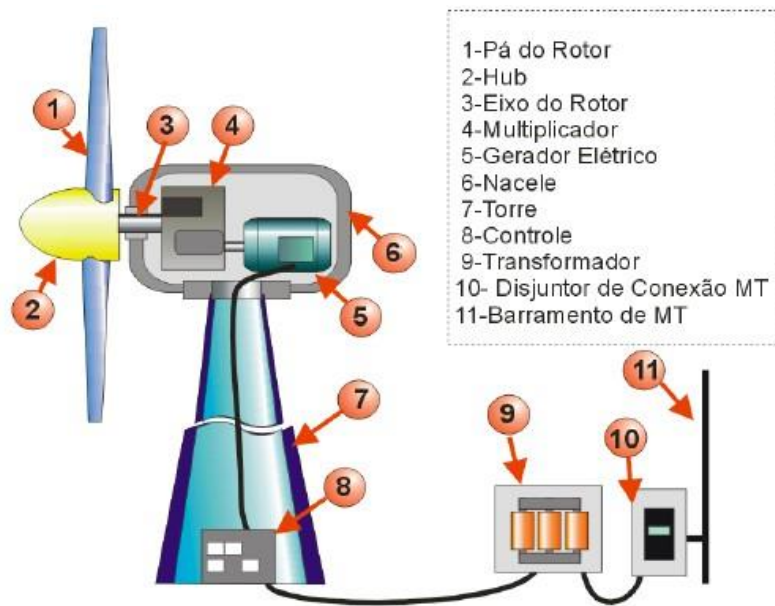


Figura 12 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal

Fonte: Adaptado de Pavinatto, 2005.

Entre os sistemas de conversão de energia eólica, destacam-se os seguintes sistemas de geração (BERNARDES, 2009), (FREITAS et al, 2011), (MATOS, 2012), (MATOS, 2013):

- (a) Gerador de indução duplamente alimentado (DFIG);
- (b) Gerador síncrono a imã permanente (GSIP);
- (c) Gerador síncrono de rotor bobinado, *wound rotor synchronous generator* (WRSB).

No sistema tipo (a), o rotor da turbina é acoplado ao gerador através de uma caixa de engrenagem e operando em diferentes intervalos de velocidades da turbina. Nos sistemas tipos (b) e (c), o gerador é um de múltiplos pólos de baixa velocidade com grande diâmetro, podendo o sistema operar sem a caixa de engrenagem. As figuras 13, 14 e 15 ilustram os sistemas de acordo com (BERNARDES, 2009).

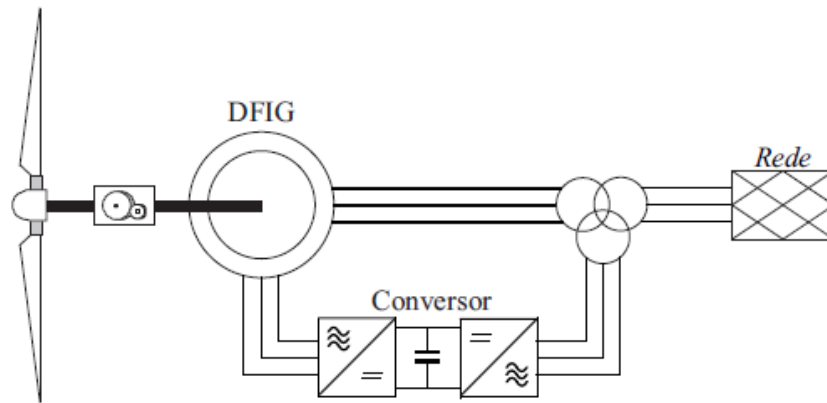


Figura 13 - Gerador de indução duplamente alimentado (DFIG)

Fonte: Adaptado de Bernardes, 2009.

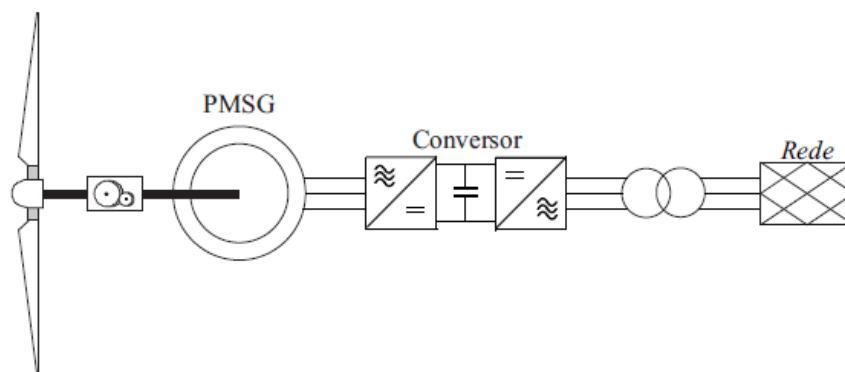


Figura 14 - Gerador síncrono a ímã permanente (GSIP)

Fonte: Adaptado de Bernardes, 2009.

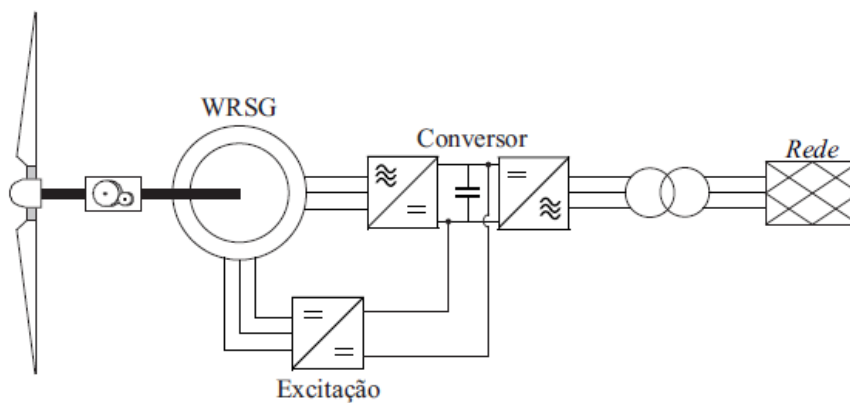


Figura 15 - Gerador síncrono de rotor bobinado (WRSG)

Fonte: Adaptado de Bernardes, 2009.

Dentre os modelos das máquinas, os geradores síncronos se diferenciam das demais topologias no ramo da geração eólica devido ao fato de permitirem a eliminação da caixa de transmissão mecânica através de geradores com grande número de pólos.

Devido às características dinâmicas e elétricas da máquina síncrona, é necessária a utilização de um conversor de frequência (CA/CC/CA) para realizar a conexão entre o gerador e o sistema elétrico (FERREIRA, 2007).

Nos sistemas eólicos, tais conversores possibilitam a operação com velocidade variável, assim apresentando as seguintes vantagens, segundo (SANTOS, 2005):

- Aumento da energia eólica extraída;
- Diminuição do nível de ruído aerodinâmico;
- Melhor qualidade da energia com redução do efeito “flicker” ou flutuação de tensão;
- O uso de retificadores a IGBT’s controlados permite produzir uma potência otimizada de saída entre uma faixa mínima e máxima em função da velocidade do vento.
- Os geradores são excitados através de imãs permanentes e dispensando fonte de excitação.

Quanto aos mecanismos de controle destinam-se à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controle de carga, etc. Pela variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga).

2.2 Turbina Eólica

O processo de conversão de energia eólica em energia elétrica é composto por um determinado número de componentes. Um desses componentes é o rotor, que extrai a energia do vento. Este método de conversão de energia eólica em energia mecânica, foi definido através de uma teoria por Albert Betz em 1926 (PINTO, 2013). Betz mostrou que a energia mecânica extraída a partir de um fluxo de ar, passa através de uma determinada área de secção transversal limitada, como mostra a Figura 16.

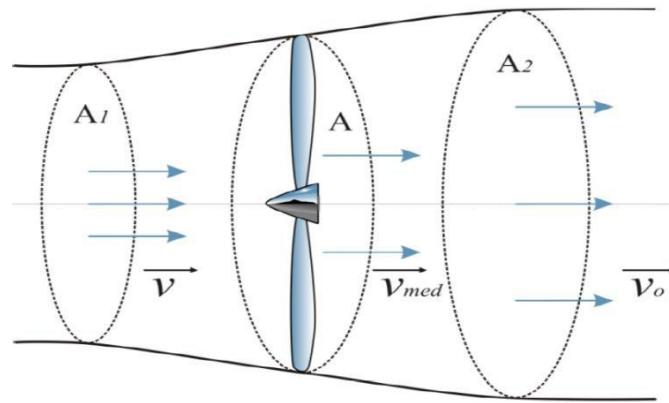


Figura 16 - Modelo teórico de Betz

Fonte: Adaptado de Tibola, 2009.

Esse fluxo de ar contém uma determinada proporção de energia, chamada de coeficiente de potência C_p . De acordo com a Figura 16, Betz chegou à conclusão de que o coeficiente de máxima potência é dado por (CRESESB, 2008):

$$C_{p_{Betz}} = \frac{v_0}{v} = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (1)$$

Ainda que a equação de Betz proporcione um limite superior, ela não é muito perfeita, já que alguns fatores não são levados em consideração, tais como (Tibola, 2009):

- As resistências aerodinâmicas das hélices;
- A perda de energia pelo atrito na rotação;
- A compressibilidade do fluido;
- A interferência das hélices e da torre.

A força produzida por uma turbina eólica depende da combinação entre o ângulo de passo (β) e a relação de velocidade (λ) na ponta das pás. Ambos os parâmetros definem o C_p da turbina, pois é fundamental para a sua modelagem. O C_p pode ser expresso por:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

Os parâmetros λ e λ_i são definidos pelas equações 3 e 4 como em Manoel (2009):

$$\lambda = \frac{u}{v_\omega} = \frac{\omega \cdot R}{v_\omega} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

sendo:

λ = razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip speed ratio*);

ω = velocidade angular da turbina eólica (rad/s);

R = raio da turbina eólica (m);

v_ω = velocidade do vento (m/s)

As curvas de C_p em função de λ e β para uma turbina, por exemplo, são demonstradas na Figura 17.

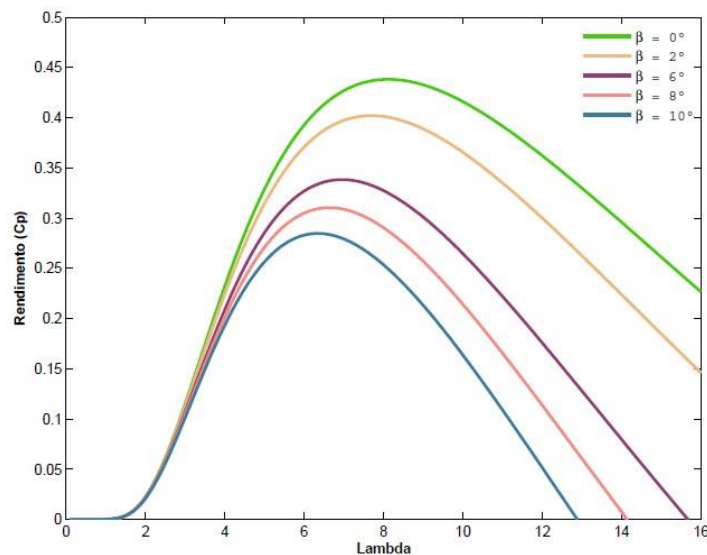


Figura 17 - Curva C_p em função Modelo teórico de λ e β

Fonte: Adaptado de Tibola, 2009.

A potência mecânica (P_m) extraída do vento por uma turbina eólica pode ser determinada por:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (5)$$

sendo:

C_p = coeficiente de potência da turbina eólica;

λ = razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip speed ratio*);

ρ = densidade do ar (1,225), (kg/m^3);

ω = velocidade angular da turbina eólica (rad/s);

A = área varrida pelo rotor da turbina eólica (m²) ou ($\pi.R^2$);

v_ω = velocidade do vento (m/s).

Um parâmetro importante nas turbinas eólicas é o torque transmitido ao eixo do rotor. O desempenho do rotor é gerado pela relação entre a potência mecânica e a frequência angular, como na equação 6. Substituindo a equação 5 em 6 obtém-se a 7.

$$T_{mec} = \frac{P_m}{\omega} \quad (6)$$

$$T_{mec} = \frac{1}{2} \rho.A. \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\omega} . v_\omega^3 \quad (7)$$

Isolando a frequência angular da equação 3 e substituindo na equação 7, obtém-se a expressão final do torque pela equação 8, em que o termo C_T é chamado de “Coeficiente de Torque” e é demonstrada na equação 9.

$$T_{mec} = \frac{1}{2} \rho.A.C_T(\lambda, \beta).v_\omega^3 \quad (8)$$

$$C_T(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (9)$$

2.3 Retificador

Os aerogeradores são interligados ao sistema elétrico através de conversores CA/CC(retificador), CC/CC(*choppers*) e CC/CA(inversor), existindo assim a necessidade de controlar tanto o sistema através dos conversores interligados ao gerador, quanto os conversores interligados à rede elétrica.

O desenvolvimento da eletrônica de potência e sua aplicação na extração de energia eólica permitiram facilitar a operação da turbina eólica de velocidade variável. Muitas soluções técnicas de sistemas elétricos em turbinas eólicas estão relacionadas com a eletrônica de potência, uma vez que eles podem melhorar os desempenhos dinâmicos e seu estado estacionário, ajudando a controlar o gerador da turbina eólica, e desacoplar o gerador da rede elétrica.

No primeiro estágio de transformação da energia elétrica CA/CC é utilizado um retificador com o objetivo de fornecer uma tensão CC ao conversor CC/CA (inversor). Uma das topologias mais citadas na literatura é a de um retificador a diodo, que são

amplamente encontrados como conversor CA/CC. Existe um elemento de ligação de corrente contínua, que pode ser através de um capacitor, em fonte de conversores de tensão (VSC), ou um indutor em conversores de fonte de corrente (CSC).

Estas topologias de conversores a diodos e conversores *boost* possibilitam a transferência de potência desde o gerador até a rede elétrica, como são demonstradas da figura 18 a 20 (FREITAS et al, 2011).

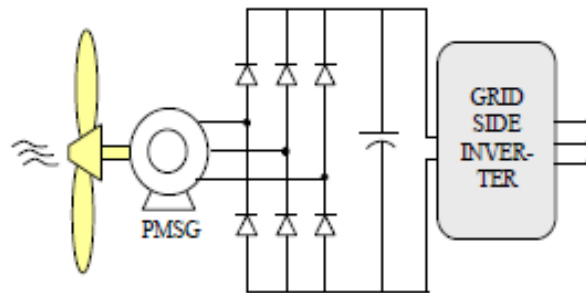


Figura 18 - Sistema de conversão baseado em retificador a diodo tipo VSC

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

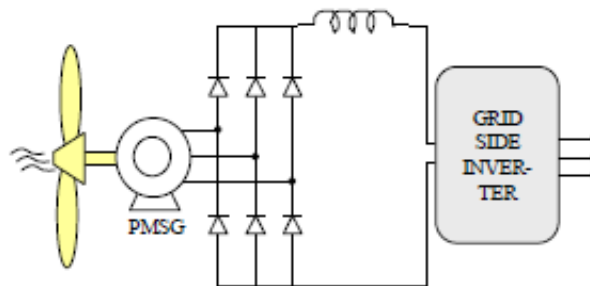


Figura 19 - Sistema de conversão baseado em retificador a diodo tipo CSC

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

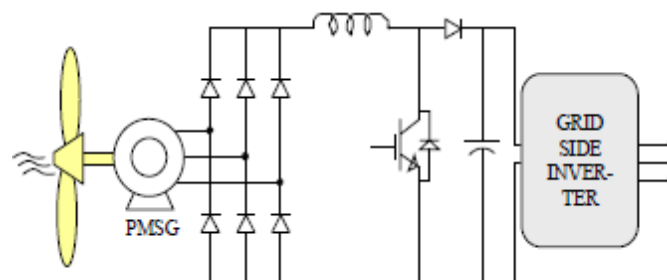


Figura 20 - Sistema de conversão baseado em retificador a diodo tipo *boost*

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

Outra topologia utilizada é a de um conversor *back-to-back* de dois níveis. A figura 21 mostra um esquema básico desta topologia usando um retificador de seis

chaves a IGBT e um inversor do lado da rede, que é idêntico ao do lado do gerador GSIP sendo controlado. Também pode ser usado um número reduzido de partes dos conversores como se pode ver na figura 22.

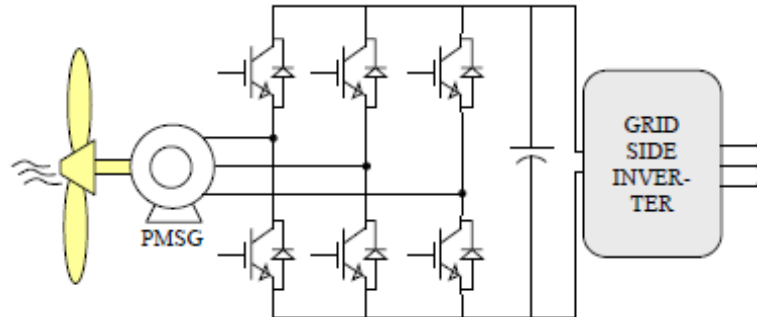


Figura 21 - Sistema de conversão baseado no conversor *back-to-back* de dois níveis

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

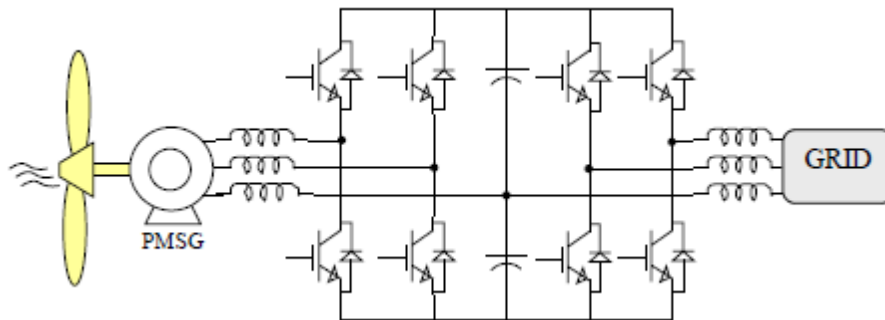


Figura 22 - Sistema de conversão baseado no conversor *back-to-back* de dois níveis com redução do número de partes do conversor

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

As topologias de conversores multiníveis também são outra forma de conversor CA/CC, onde a figura 23 apresenta um exemplo desta topologia de conversor. Outras formas de topologias utilizam, por exemplo, a associação controlada (IGBT's) e elementos não controlado (diodos), formando um retificador *boost* semi-controlado. Uma destas topologias pode ser visto na Figura 24.

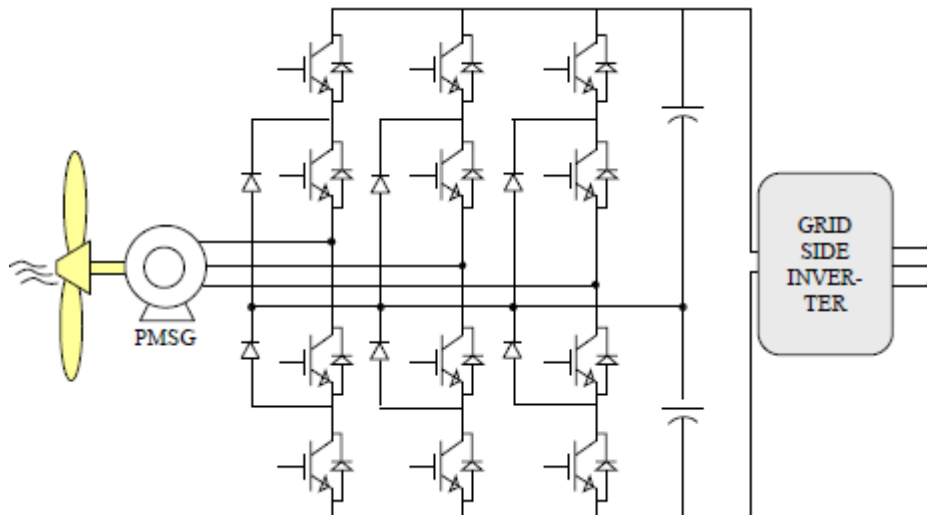


Figura 23 - Sistema de conversão baseado em conversor multinível

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

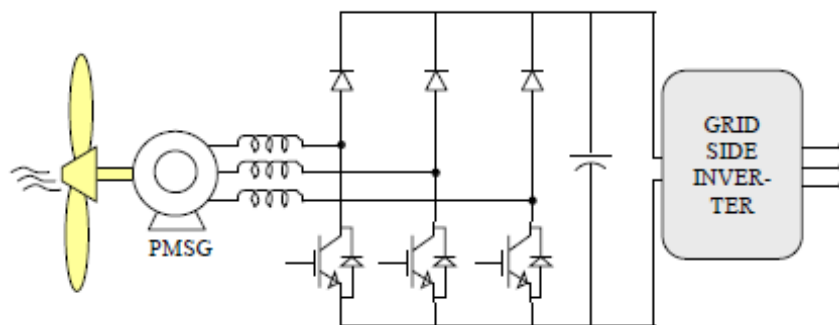


Figura 24 - Sistema baseado no retificador semi-controlado – conversor *boost*

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

É também apresentado na literatura de (FREITAS et al, 2011) a utilização de um conversor matriz, é uma solução cara, mesmo em alta potência, e sua complexidade de controle não estimula o seu uso, como mostra a figura 25. A adição de diodos em série com IGBTs habilita o bloqueio de tensões reversas. Entretanto as perdas de condução deste diodo adicionam uma parcela considerável aos conversores, sabendo desta problemática (TAKEI, 2003) desenvolveu o RB-IGBT(*Reverse Blocking*) para minimizar o problema, conforme a figura 26.

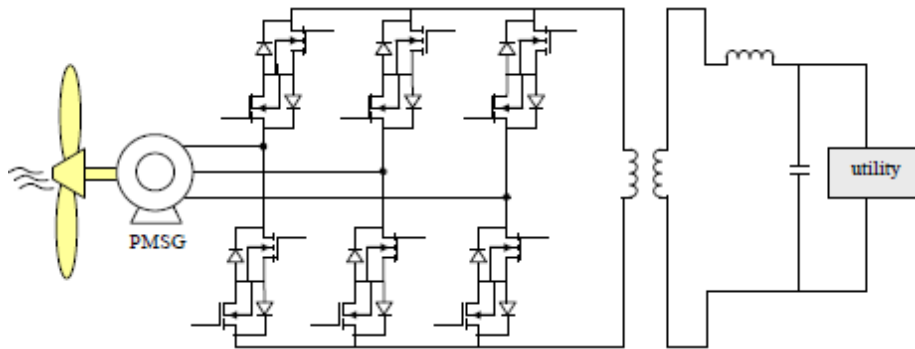


Figura 25 - Sistema de conversão baseado no conversor matriz

Fonte: Adaptado de Freitas, 2011.

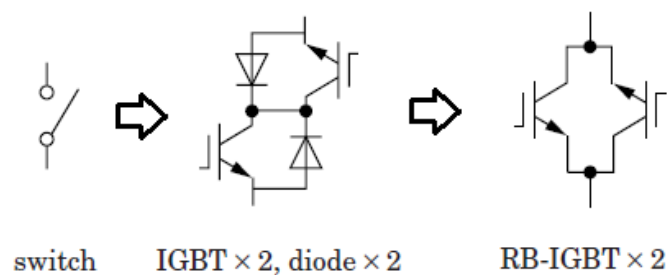


Figura 26 - Chaves bidirecionais usadas em um conversor matriz

Fonte: Adaptado de TAKEI, 2003.

Na figura 27, a topologia mostrada utiliza três conversores monofásicos na etapa do retificador.

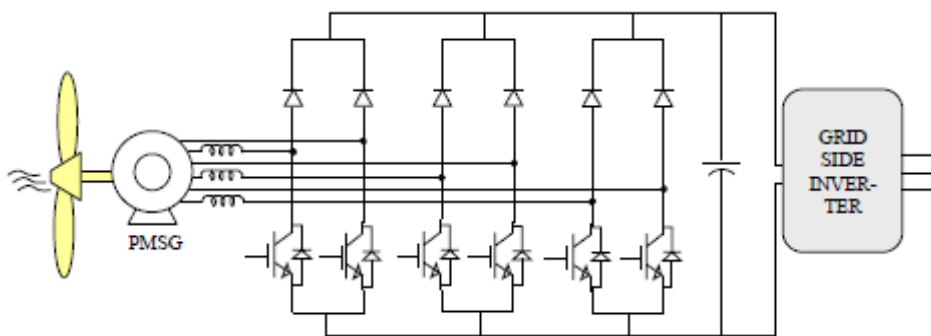


Figura 27 - Retificador trifásico de onda completa não controlado

Fonte: Adaptado de Pomillo, 2014.

Neste trabalho, o gerador síncrono a imã permanente através do estator é conectado a um retificador trifásico a diodos não controlado de onda completa, pois representa uma solução barata, simples e com baixos valores de perdas (CARVALHO, 2010), como detalha a figura 28.

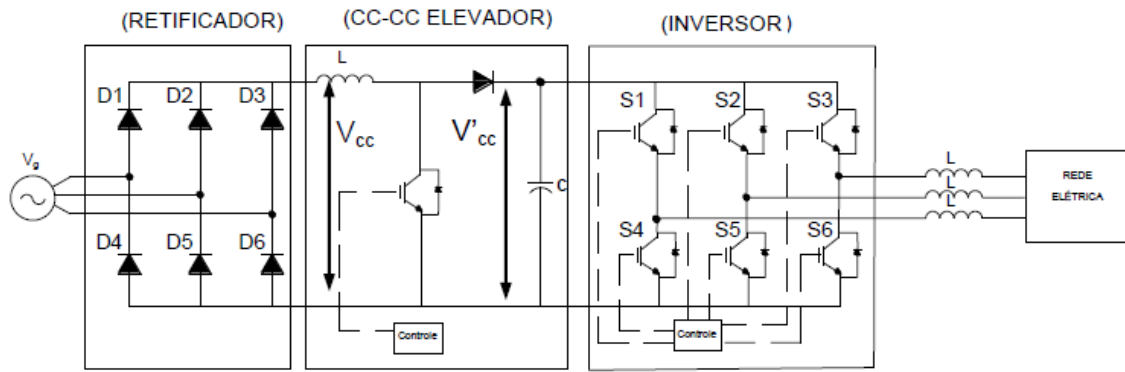


Figura 28 - Gerador conectado ao retificador trifásico de onda completa não controlado

Fonte: Adaptado de Nascimento, 2009.

2.4 Conversor Boost

O conversor *boost*, *chopper step-up* ou elevador de tensão, como costuma ser denominado é usado para converter tensão CC de entrada variável para uma tensão de CC de saída diversas vezes maior, como mostra a figura 29.

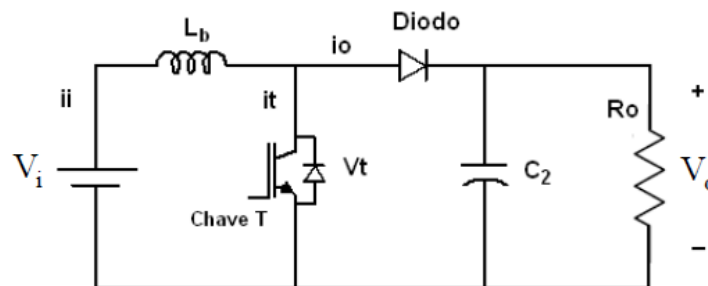


Figura 29 - Circuito do conversor boost

Fonte: Adaptado de Manoel, 2009.

No circuito quando a chave T passa para o estado ligado, o indutor fica conectado à alimentação V_i . Neste instante, a tensão V_L passará a ter o valor da fonte V_i , porém a corrente no indutor aumentará de forma linear armazenando energia no campo magnético. Quando a chave T for aberta, haverá uma queda muito rápida da corrente e a energia antes armazenada no indutor será transferida para o capacitor. Dessa forma, a tensão no indutor se somará com a tensão da fonte para assim aumentar a tensão de saída (AHMED, 2000).

Na sequência, são apresentadas na Tabela 2, as especificações do conversor *boost*, respectivamente.

Tabela 2 - Parâmetros para o conversor *boost*

Parâmetro	Especificações
Tensão de Entrada (V_i)	337 V
Tensão de Saída (V_o)	700 V
Frequência de Chaveamento (F_s)	10 kHz
Potência Nominal (P_o)	25 KW
Ondulação de Tensão (ΔV_{bar})	1%
Ondulação de Corrente (ΔI_L)	5%

Fonte: Adaptado de Bezerra, 2010.

De acordo com as especificações da Tabela 2, são dimensionados os componentes que constituem o conversor *boost*, respectivamente.

2.4.1 Dimensionamento do Indutor, Capacitor e Resistor

Considerando a chave T um IGBT do circuito *boost* com uma frequência de chaveamento fixa e desprezando as perdas, a potência de entrada será a potência de saída, logo se têm as seguintes equações para as correntes:

$$I_i = \frac{P_o}{V_i} = 74,2A \quad (10)$$

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = 35,72A \quad (21)$$

A relação entre a tensão de saída (V_o) e a tensão de entrada (V_i) é definida por ganho estático do conversor, e dada por:

$$d = \frac{V_o}{V_i} = 2,07 \quad (12)$$

Seja a ondulação da tensão no capacitor igual a 1% e a ondulação da corrente na carga de 5%, pode-se escrever as seguintes equações:

$$\Delta v = 0,01 \times V_o \quad (13)$$

$$\Delta I = 0,05 \times V_i \quad (14)$$

Para que a chave opere com uma frequência fixa, é obtida a razão cíclica do tempo de condução, ou seja, quando a chave T está conduzindo e quando está bloqueada, como mostra a Figura 29.

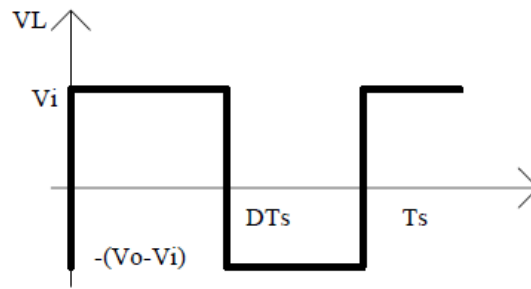


Figura 30 - Tensão sobre o indutor

Fonte: Adaptado de Manoel, 2009.

A partir da Figura 30, a tensão média sobre o indutor deve ser nula, então temos as equações (16) e (17) para encontrar a razão cíclica.

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} v_i dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D)T_s} (v_o - v_i) dt \quad (15)$$

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{1-D} \quad (16)$$

ou,

$$D = 1 - \frac{v_i}{v_o} = 0,5185 \quad (17)$$

O dimensionamento do indutor será:

$$L = \frac{V_i \times D}{F_s \times \Delta I} = 1,037 mH \quad (18)$$

O capacitor atua como um filtro no circuito, no cálculo foi utilizado a equação 19:

$$C = \frac{I_o \times D}{F_s \times \Delta v_c} = 264,58 \mu F \quad (19)$$

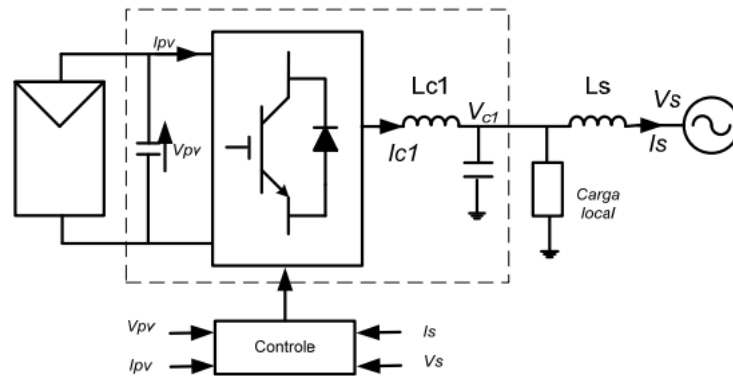
A carga é calculada para atingir a potência e tensão estabelecida, como segue:

$$R = \frac{v_o}{I_o} = 19,6 \Omega \quad (20)$$

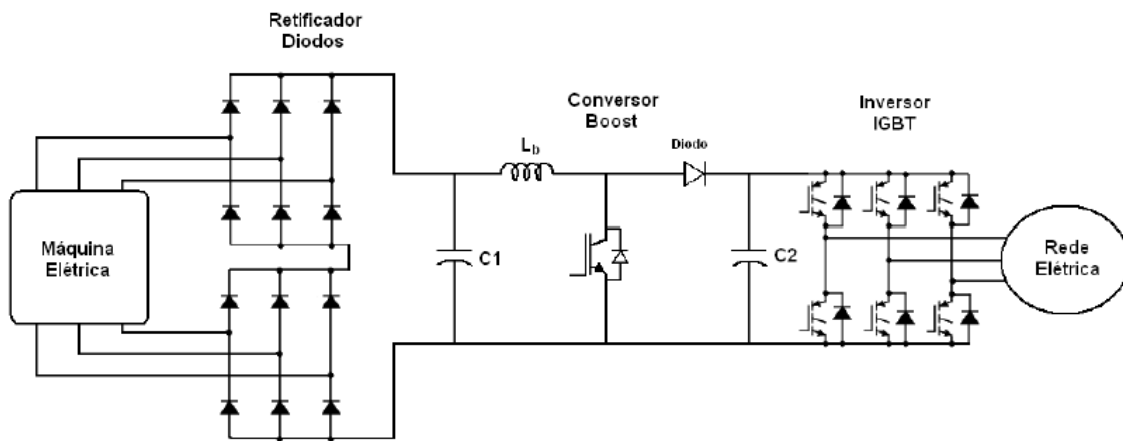
2.5 Inversor

O conversor CC/CA ou inversor como comumente chamado é responsável pelo interfaceamento entre o sistema eólico e a rede elétrica. Ele transforma a corrente contínua presente no barramento CC em corrente alternada (60Hz). Além disso, o

inversor injeta potência ativa na rede elétrica, como também pode injetar ou absorver potência reativa da rede elétrica, controlando a tensão no barramento e ou na barra de conexão com a rede elétrica e manter a correção sob o fator de potência (PAVINATTO, 2005). A figura 31 (a) e (b) mostram esquemas da conexão de conversores na rede elétrica.



(a)



(b)

Figura 31 - Sistemas de conexão com à rede elétrica (a) Sistema solar (b) Sistema eólico da Enercon

Fonte: Adaptado de Lopes, 2006 e Manoel, 2009.

2.6 Qualidade da Energia

O conceito de Qualidade da Energia está relacionado ao problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulta em falha ou má operação de equipamento dos consumidores (DUGAN et al, 2004).

Neste contexto de qualidade, tem-se observado um avanço na conexão de unidades eólicas à rede elétrica, que constitui a mais importante utilização de energia oriunda dos ventos, de maneira que, possíveis oscilações no torque do gerador, ocasionadas pelo regime de vento, são refletidas na tensão gerada, trazendo alterações que devem ser mantidas dentro de limites técnicos a fim de que seja mantido o bom funcionamento do sistema elétrico como todo.

Nesta geração, a qualidade da energia descreve o desempenho elétrico da turbina, em que qualquer perturbação da rede elétrica deve ser mantida dentro de certos limites técnicos. Assim, muitos estudos são realizados para avaliar o impacto de uma instalação em parques eólicos conectado à rede elétrica para garantir as condições efetivas de funcionamento dos sistemas sem reduzir a qualidade da energia aos consumidores.

A tabela 3 descreve os principais distúrbios causados por turbinas eólicas na rede elétrica e as respectivas causas que podem ser resumidas em condições meteorológicas, do terreno, e especificamente sobre as características elétricas, aerodinâmicas, mecânicas e de controle presente na turbina eólica.

Tabela 3 - Distúrbios causados por turbinas eólicas

Distúrbios	Causa
Elevação/Queda de Tensão	Valor médio da potência entregue
Flutuação de Tensão e Cintilação	<ul style="list-style-type: none"> • Operações de chaveamento • Efeito de sombreamento da torre • Erro de passo da pá • Erro de mudança de direção • Distribuição vertical do vento • Flutuações a velocidade do vento • Intensidade de turbulências
Harmônicos	<ul style="list-style-type: none"> • Conversores de frequência • Controladores tiristorizados • Capacitores • Arranque suave de gerador de indução
Consumo de Potência Reativa	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes indutivos ou sistemas de geração • Gerador de indução

Fonte: Adaptado de Dutra, 2008, Schwanz, 2012 e Mundackal, 2013.

Do ponto de vista de projeto, seja qual for a máquina e a configuração do sistema eólico conectado à rede elétrica, cada turbina tem um efeito sobre a qualidade da energia no sistema de transmissão.

Para Mundakal (2013) a conexão do sistema eólico proporcionou novos códigos de rede, pois se identificou problemas devido a grande quantidade de ventos na geração de energia elétrica. Diante disso sugere que a exploração dos ventos deva ser capaz de fornecer controle de tensão, potência reativa, frequência, a fim de manter a estabilidade do sistema elétrico para os parques eólicos com velocidade variável.

Para o Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico - (ONS) dispõe de Procedimentos de Redes, que são documentos de caráter normativo elaborado pelo ONS, com participação dos agentes, e aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que definem os procedimentos e os requisitos necessários à realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real no âmbito do Sistema Interligado Nacional (SIN).

As atividades do ONS são baseadas em regras, critérios e procedimentos técnicos, que estão codificados e organizados em módulos constituindo os Procedimentos de Rede. Os principais módulos são:

- Módulo 2 - Requisitos mínimos para instalações de transmissão e gerenciamento de indicadores de desempenho, que consta do submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e seus componentes (ONS, 2011);
- Módulo 3 - Acesso aos sistemas de transmissão, que consta do submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão (ONS, 2010).

Nestes procedimentos de redes, apresentam-se os indicadores de desempenho básicos relacionados à qualidade da energia elétrica e os valores limites de referência, no aspecto tanto global ou sistêmico, como individual ou por agente. As centrais de geração eólica devem preservar os padrões de desempenho definidos no submódulo 2.8. Na tabela 4 são relacionados os requisitos técnicos gerais para as centrais de geração eólica referente ao submódulo 3.6.

Tabela 4 - Requisitos técnicos gerais

Descrição	Requisitos Técnicos Mínimos	Benefício
Operação em regime de frequência não nominal	<ul style="list-style-type: none"> • Operação entre 56,5 e 63 Hz sem atuação dos relés de subfrequência instantâneos. • Operação abaixo de 58,5 Hz por até 10 segundos. • Operação entre 58,5 e 61,5 Hz sem atuação dos relés de subfrequência temporizados. • Operação acima de 61,5 Hz por até 10 segundos. 	Evitar o desligamento dos geradores quando de déficit de geração, antes que o esquema de alívio de carga atue completamente ou em condições de sobrefrequência controláveis.
Geração/absorção de reativos	No ponto de conexão, a central geradora eólica deve propiciar os recursos necessários para, em potência ativa nominal (2) e quando solicitado pelo ONS, operar com fator indutivo ou capacitivo dentro da faixa especificada abaixo: (a) Mínimo de 0,95 capacitivo. (b) Mínimo de 0,95 indutivo.	Participação efetiva no controle da tensão, aumentando as margens de estabilidade de tensão.
Operação em regime de tensão não nominal	No ponto de conexão da central geradora: (a) Operação entre 0,90 e 1,10 p.u. da tensão nominal sem atuação dos relés de subtensão e sobretensão temporizados. (b) Operação entre 0,85 e 0,90 p.u. da tensão nominal por até 5 segundos.	Evitar o desligamento da usina quando há variações de tensão no sistema.
Participação em SEP	Possibilidade de desconexão automática ou redução de geração mediante controle de passo e/ou de <i>stall</i> das pás.	Minimizar consequências de perturbações no sistema, incluindo sobrefrequência no caso de ilhamento.
Potência ativa de saída	Para tensões no ponto de conexão entre 0,90 e 1,10 p.u, para a central geradora eólica não será admitida redução na sua potência de saída, na faixa de frequências entre 58,5 e 60,0 Hz. Para frequências na faixa entre 57 e 58,5 Hz é admitida redução na potência de saída de até 10%. Esses requisitos aplicam-se em condições de operação de regime permanente, quase estática (3).	Garantir a disponibilidade de potência das centrais de geração eólica em situações de subfrequências de modo a evitar/minimizar os cortes de carga por atuação do ERAC.

Fonte: Adaptado da ONS, 2010.

2.6.1 Suportabilidade e Afundamentos de Tensão

Um dos desafios dos parques eólicos está relacionado à conexão com a rede elétrica, devido à penetração desta geração a suportabilidade a afundamentos momentâneos de tensão se caracterizou como um item básico de exigência.

Caso haja a ocorrência de um afundamento de tensão em uma ou mais fases no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), a geração eólica deve continuar operando na entrega de potência ativa, se a tensão nos seus terminais permanecer acima da curva indicada na figura 32 (ONS, 2010). Conseqüentemente isso exige que os fabricantes de aerogeradores tenham equipamentos que garantam suportar todos os estresses elétricos ocasionados por distúrbios na rede e responsáveis por afundamentos (ZANCHETTIN, 2012).

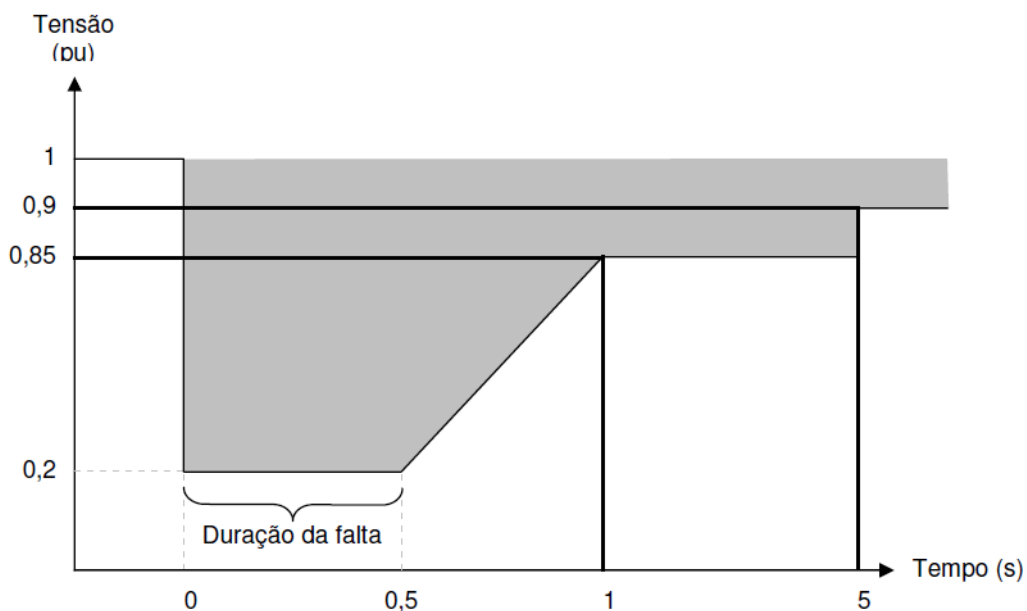


Figura 32 - Tensão nos terminais dos aerogeradores

Fonte: Adaptado da ONS, 2010.

Os afundamentos podem ser caracterizados como variações de tensão de curta duração (VTCD), tipos instantâneos, momentâneos e temporários. São usualmente associados às faltas no sistema (curtos-circuitos), mas podem também ser causados por energização de grandes cargas, porém quando a tensão do sistema cai de 30% ou mais, o estado deste é considerado crítico. A tabela 5 demonstra detalhadamente cada tipo.

Tabela 5 - Tipos de VTCD em afundamentos de tensão

Varição de Curta Duração	Duração Típica	Amplitude de Tensão Típica
Instantâneo	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
Momentâneo	30 ciclos – 3 s	
Temporário	3 s – 1 min	

Fonte: Adaptado de Oleskovicz, 2007 e ONS, 2010.

2.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas todas as etapas do sistema de geração eólica, até a conexão com a rede elétrica. Pôde-se verificar as principais tecnologias para o conversor CA/CC (retificador) e o princípio de funcionamento do conversor CC/CC (*boost*), como também o dimensionamento dos componentes no conversor CC/CC. Por fim, demonstrou os problemas proporcionados pela geração conectada à rede elétrica.

Capítulo 3 - Modelagem e Controle do Sistema

Este capítulo apresenta as abordagens matemáticas do sistema de controle proposto neste trabalho, bem como da malha de corrente do conversor *boost* para a máxima extração de potência do conversor *boost*, controle do conversor *boost*, conversor do lado da rede (CLR) e controle do conversor do lado da rede. As modelagens determinam os modelos matemáticos que descrevem o comportamento de um sistema, ou seja, é possível observar a influência de cada parâmetro em regime permanente e em regime transitório (VOLTONI, 2007), (BERNARDES, 2009), (BEZERRA, 2010), (KUCHENBECKER, 2012).

3.1 Malha de Corrente do Conversor *Boost* - MPPT

Considerando que para cada velocidade de vento existe um valor de máxima potência, logo existe um interesse em fazer o conversor *boost* trabalhar nesta captação de máxima extração de potência. Para isto o conversor *boost* deve ser controlado para que o valor médio da tensão de saída permaneça isento às variações na tensão de entrada e da carga do sistema, como já mostrado na figura 29. A tensão de saída pode ser controlada através da chave T (IGBT), ajustando os tempos de abertura (t_{on}) e fechamento (t_{off}) a partir da razão cíclica e das leituras aplicadas ao sistema eólico.

Para controlar a chave, a Figura 33 mostra o respectivo controle da malha de corrente.

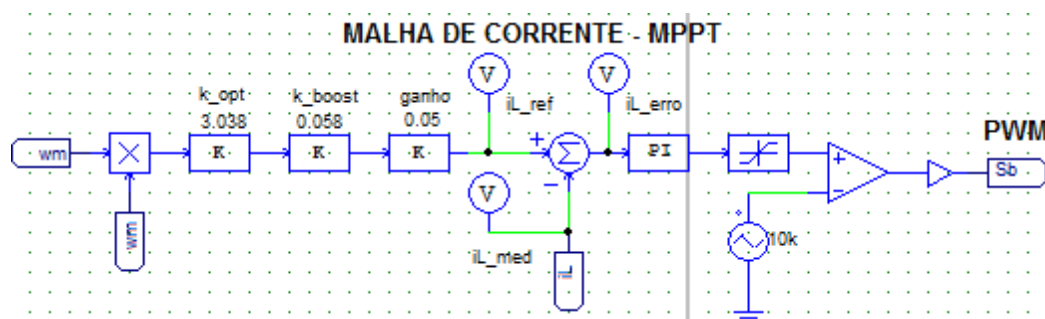


Figura 33 - Malha de controle da corrente no conversor *boost*

Fonte: Autoria Própria, 2014.

Inicialmente é possível obter a corrente de referência através de:

$$i_L = k_{boost} \cdot k_{opt} \cdot \omega_m^2 \tag{21}$$

Esta relação i_L comparada com a corrente medida implica na obtenção do erro da corrente (figura 34), que será aplicada à entrada de um controlador PI. O sinal de saída desse controlador PI serve como parâmetro para a modulação PWM, gerando assim, os pulsos necessários para a abertura e fechamento da chave T (IGBT) do conversor *boost*.

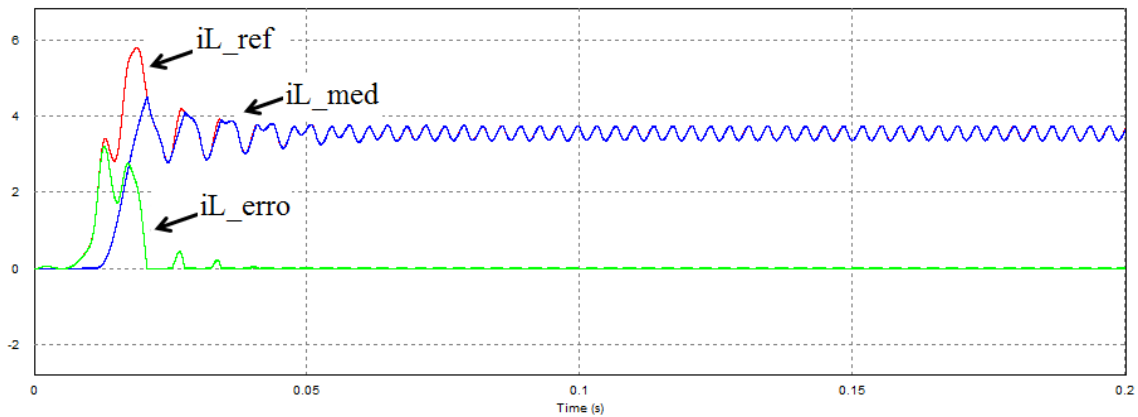


Figura 34 - Comparação da corrente de referência, medida e erro.

Fonte: Autoria Própria, 2014.

3.1.1 Modulação Por Largura de Pulso (PWM)

Com o objetivo de obter o sinal de comando para a chave T(IGBT), uma das formas é fazer a comparação do sinal de controle (modulante) com uma onda periódica (portadora), como por exemplo, uma “dente de serra” para gerar um trem de pulsos de comando (POMILO, 2014), como é apresentado na Figura 35.

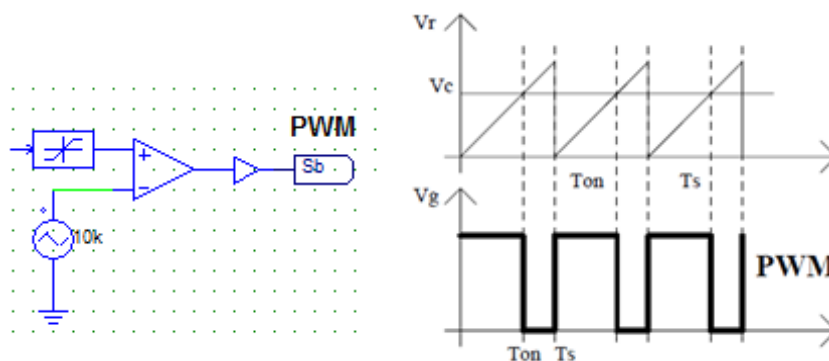


Figura 35 - Geração de pulsos PWM

Fonte: Adaptador de Batschauer, 2014.

Logo, quando a chave está desligada (0% de PWM corresponde a 0% de potência aplicada à carga), a potência aplicada é nula. No instante em que a chave for acionada (100% de PWM corresponde a 100% de potência aplicada à mesma), a potência transferida é máxima.

3.2 Conversor do Lado da Rede (CLR)

O CLR tem a função de manter a tensão no barramento CC constante e controlar a corrente reativa injetada na rede. Será utilizado o método de controle de tensão no barramento CC comparando com o sinal de referência CC no sistema tradicional de controle (BEZERRA, 2010).

Considerando o conversor conectado à rede elétrica trifásica através de uma indutância L e resistência R , onde R representa o somatório da rede com a resistência do indutor do filtro do conversor e L representa o somatório da indutância da rede com a do indutor do filtro do conversor, procura-se adotar as correntes da esquerda para a direita, pode-se representar as seguintes equações a partir da figura 36:

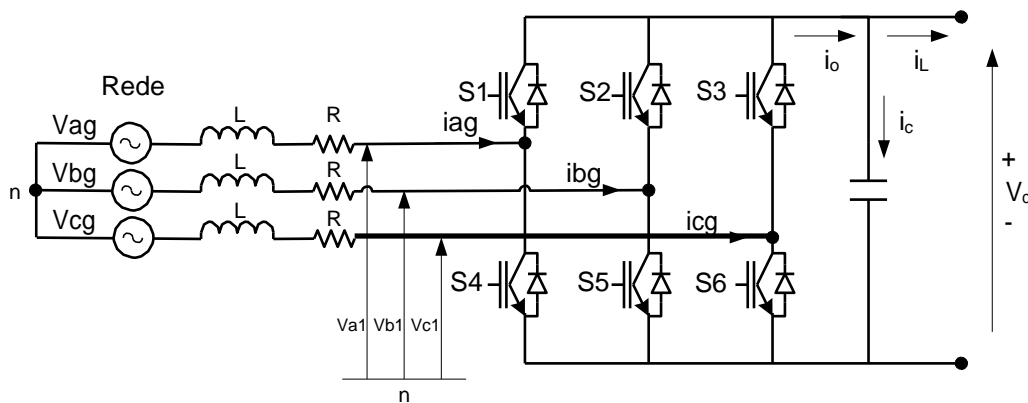


Figura 36 - Inversor com IGBT

Fonte: Autoria própria, 2014.

Adotando R e L como valores iguais, chega-se a seguinte matriz em (25):

$$V_{ag} = R \cdot i_a + \frac{d}{dt} L \cdot i_a(t) + V_{a1} \tag{22}$$

$$V_{bg} = R \cdot i_b + \frac{d}{dt} L \cdot i_b(t) + V_{b1} \tag{23}$$

$$V_{cg} = R_{cg} \cdot i_{cg} + \frac{d}{dt} L_{cg} \cdot i_{cg}(t) + V_{c1} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ag} \\ v_{bg} \\ v_{cg} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{ag} \\ i_{bg} \\ i_{cg} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ag} \\ i_{bg} \\ i_{cg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Transformando as equações de V_{abc} (25) em α/β (Clark), temos que a matriz de transformação α/β é:

$$A^{-1} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$A^{-1} \begin{bmatrix} V \\ \end{bmatrix}_{abcg} = A^{-1} \cdot R \cdot \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{abcg} + A^{-1} \cdot L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{abcg} + A^{-1} \begin{bmatrix} V \\ \end{bmatrix}_{abcg} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} V \\ \end{bmatrix}_{0\alpha\beta g} = A^{-1} \cdot R \cdot \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{0\alpha\beta g} + A^{-1} \cdot L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{0\alpha\beta g} + A^{-1} \begin{bmatrix} V \\ \end{bmatrix}_{0\alpha\beta g} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V^\alpha \\ V^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{d}{dt} L & 0 & 0 \\ 0 & R + \frac{d}{dt} L & 0 \\ 0 & 0 & R + \frac{d}{dt} L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i^\alpha \\ i^\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{01} \\ V_{\alpha 1} \\ V_{\beta 1} \end{bmatrix} \quad (29)$$

A partir da matriz (29), transforma-se em coordenadas $dq0$ (Park):

$$B^{-1} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \text{sen}(\omega t) \\ -\text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{bmatrix} V \\ \end{bmatrix}_{\alpha\beta g} = R \cdot \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{\alpha\beta g} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{\alpha\beta g} + \begin{bmatrix} V \\ \end{bmatrix}_{\alpha\beta 1} \quad (31)$$

$$B^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V \\ \end{bmatrix}_{\alpha\beta g} = B^{-1} \cdot R \cdot \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{\alpha\beta g} + B^{-1} \cdot \frac{d}{dt} L \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{\alpha\beta g} + B^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V \\ \end{bmatrix}_{\alpha\beta 1} \quad (32)$$

onde:

$$B^{-1} \cdot \left[\frac{d}{dt} \right] \cdot B = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \omega \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} V \\ \end{bmatrix}_{dqg} = R \cdot \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{dqg} + \frac{d}{dt} L \cdot \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{dqg} + \begin{bmatrix} \omega & 0 \\ 0 & \omega \end{bmatrix} L \cdot \begin{bmatrix} i \\ \end{bmatrix}_{dqg} + \begin{bmatrix} v \\ \end{bmatrix}_{dq1} \quad (34)$$

$$V_{dg} = R_{dg} i_{dg} + \frac{d}{dt} L_{dg} i_{dg} - \omega L_{dq} i_{dq} + v_{d1} \quad (35)$$

$$V_{qg} = R_{qg} i_{qg} + \frac{d}{dt} L_{qg} i_{qg} + \omega L_{dg} i_{dg} + v_{q1} \quad (36)$$

3.3 Controle do Conversor do Lado da Rede

A partir das equações (35 e 36) do item 3.2, serão desenvolvidas as modelagens do controle do lado da rede para o uso de controladores PI, híbrido (PI + LQR) e LQR.

3.3.1 Controlador PI

A figura 37 mostra a configuração típica do sistema de controle baseado no controlado PI para o CLR, onde a componente I_{dg} irá controlar a potência ativa para o controle da tensão no barramento CC e a componente I_{qg} irá controlar a potência reativa.

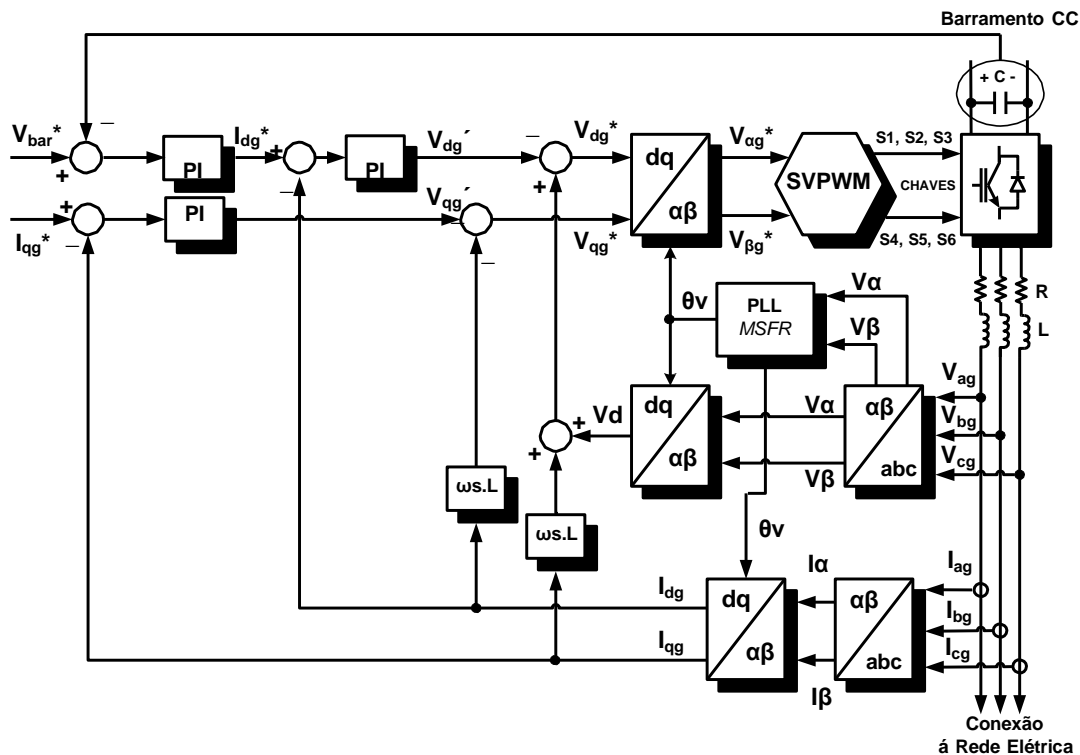


Figura 377 - Sistema de controle do conversor do lado da rede

Fonte: Adaptado de VOLTONI, 2007.

Para cálculo das potências ativa e reativa, são considerados as seguintes equações em coordenadas dq :

$$P = \frac{3}{2} (V_{dg} i_{dg} + V_{qg} i_{qg}) \quad (37)$$

$$V_{qg} = R i_{qg} + \frac{d}{dt} L i_{qg} + \omega L i_{dg} + v_{q1} \quad (38)$$

onde:

$$V_{dg} = V_g \quad (39)$$

$$V_{qg} = 0 \quad (40)$$

$$P = \frac{3}{2} v_{dg} i_{qg} \quad (41)$$

$$Q = -\frac{3}{2} v_{dg} i_{dg} \quad (42)$$

3.3.2 Projeto das Malhas de Corrente

A partir das equações (35) e (36), têm se:

$$V_{dg} + \omega L i_{qg} - v_{d1} = R i_{dg} + L \frac{d}{dt} i_{dg} = v_{d1} \quad (43)$$

$$V_{qg} - \omega L i_{dg} - v_{q1} = R i_{qg} + L \frac{d}{dt} i_{qg} = v_{q1} \quad (44)$$

Observa-se que existem nas equações dos eixos d e q acoplamentos cruzados:

$$V_{dcomp} = \omega L i_{qg} + v_{dg} \quad (45)$$

$$V_{qcomp} = -\omega L i_{dg} + v_{qg} \quad (46)$$

Portanto, o sistema a ser controlado será:

$$V_{dg}' = R i_{dg} + L \frac{d}{dt} i_{dg} \quad (47)$$

$$V_{qg}' = R i_{qg} + L \frac{d}{dt} i_{qg} \quad (48)$$

Considerando as resistências R , as indutâncias L iguais e organizando, aplica-se Laplace:

$$L \frac{d}{dt} i_{dg} = R i_{dg} - v_{dg}' \quad (49)$$

$$L \frac{d}{dt} i_{qg} = R i_{qg} + v_{qg}' \quad (50)$$

$$S.L \begin{bmatrix} I_{dg} \\ I_{qg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ -L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dg}(s) \\ I_{qg}(s) \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{dg}' \\ v_{qg}' \end{bmatrix} \quad (51)$$

ou,

$$L.S.I_{dg}(s) + R.I_{dg}(s) = v_{dg}' \quad (52)$$

$$L.S.I_{qg}(s) + R.I_{qg}(s) = v_{qg}' \quad (53)$$

Isolando $I_{dg}(s)$ e $I_{qg}(s)$:

$$I_{dg}(s) = \frac{v_{dg}'(s)}{R + Ls} \Leftrightarrow \frac{I_{dg}(s)}{v_{dg}'(s)} = \frac{1}{R + Ls} \quad (54)$$

$$I_{qg}(s) = \frac{v_{qg}'(s)}{R + Ls} \Leftrightarrow \frac{I_{qg}(s)}{v_{qg}'(s)} = \frac{1}{R + Ls} \quad (55)$$

Após a aplicação de Laplace foram obtidas as funções de transferências em (54) e (55), das malhas de corrente, ou seja:

$$\frac{I_{dg}(s)}{v_{dg}'(s)} = \frac{I_{qg}(s)}{v_{qg}'(s)} = G_g(s) \quad (56)$$

onde:

$$G_g(s) = \frac{1}{R + Ls} \quad (57)$$

A partir de (54) e (55), o projeto do controlador da malha de corrente I_{dg} e I_{qg} , são demonstradas em diagramas de blocos na figura 38.

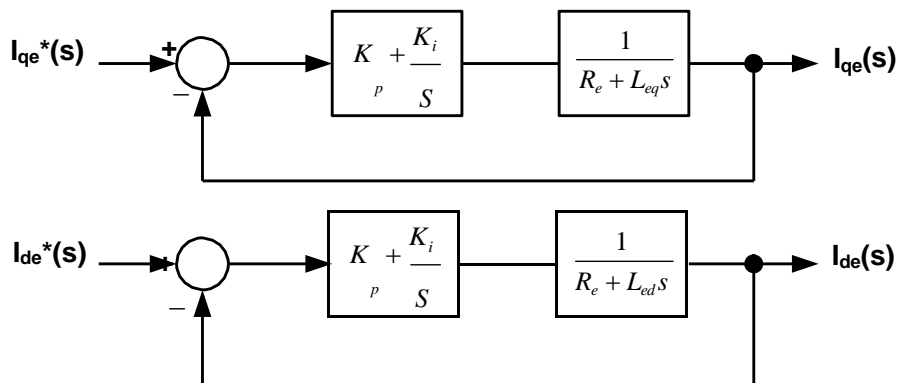


Figura 388 - Sistema de controle para as correntes I_d e I_q

Fonte: Autoria própria, 2013.

O controlador PI possui dois parâmetros a serem ajustados, que é o ganho proporcional e integral do controlador de corrente, os quais são determinados pelo equacionamento matemático. A função de transferência no domínio contínuo do controlador PI é dada por:

$$G_{PI}(s) = K_{ps} + \frac{K_{is}}{s} = \frac{K_{ps}s + K_{is}}{s} \quad (58)$$

Considerando realimentação unitária, a função de transferência em malha fechada (controlador + planta) é descrita pela seguinte equação:

$$G_{MF}(s) = \frac{\frac{K_{ps}s + K_{is}}{L}}{s^2 + \left(\frac{K_{ps}}{L}\right)s + \frac{K_{is}}{L}} \quad (59)$$

A partir de (57), (58), (59) e considerando que a resistência $R = 1m\Omega$ e $L=2.1mH$, os ajustes dos controladores serão projetados através do Método do Lugar das Raízes, conforme (BAZANELLA, 2005), ou seja:

$$G_{PI}(s) = K \left(\frac{s + z}{s} \right) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (60)$$

Planta do sistema:

$$G_{PI}(s) = \frac{1/L}{s + R/L} = \frac{476,2}{s + 476,2} \quad (61)$$

Há dois parâmetros para ajustar em (60), Z é a posição do zero do controlador e K é o ganho. O ganho K pode então ser escolhido de forma que os pólos de malha fechada estejam no eixo real, bem a esquerda do pólo do processo, resultando em uma resposta bem mais rápida à perturbação. Como temos um pólo no numerador de $s = -476,2$ em (61), será alocado um novo zero para $s = -500$ (BAZANELLA, 2005), assim determina o novo zero da planta do controlador. Logo obteremos a planta do controlador:

$$G_c(s) = \frac{s + 500}{s} \quad (62)$$

Para determinar o ganho K , pode-se fazer uma escolha simplificada, que é alocar o zero do controlador na posição ($s = -550$), em seguida usa a equação característica do sistema de malha fechada (BAZANELLA, 2005), conforme a figura 39 e o desenvolvimento analítico da equação (63):

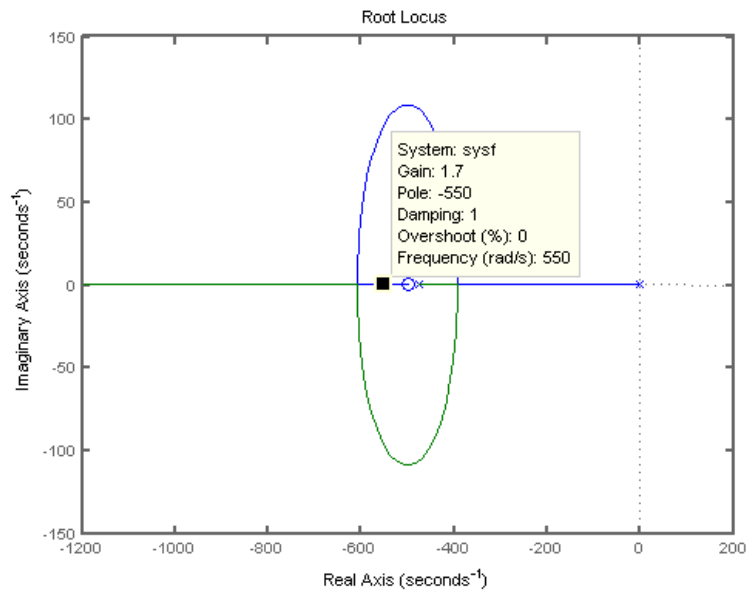


Figura 39 - Gráfico *Root Locus*

Fonte: Autoria própria, 2013.

$$|K \times G_p \times G_c|_{s=-550} = 1 \Leftrightarrow K = 1,72 \quad (63)$$

Portanto, K_p e K_i serão obtidos a partir do ganho K e da planta do controlador G_c (108):

$$K \times G_c(s) \Leftrightarrow \frac{1,72s + 860}{s} \quad (64)$$

onde:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K}{s} \frac{s + K}{s} = \frac{1,72s + 860}{s} \quad (65)$$

Com a comparação entre as equações em (65), têm-se o $K_p = 1,72$ e $K_i = 860$. A Figura 40 mostra a resposta do sistema para o projeto dos controladores, aplicando uma entrada degrau.

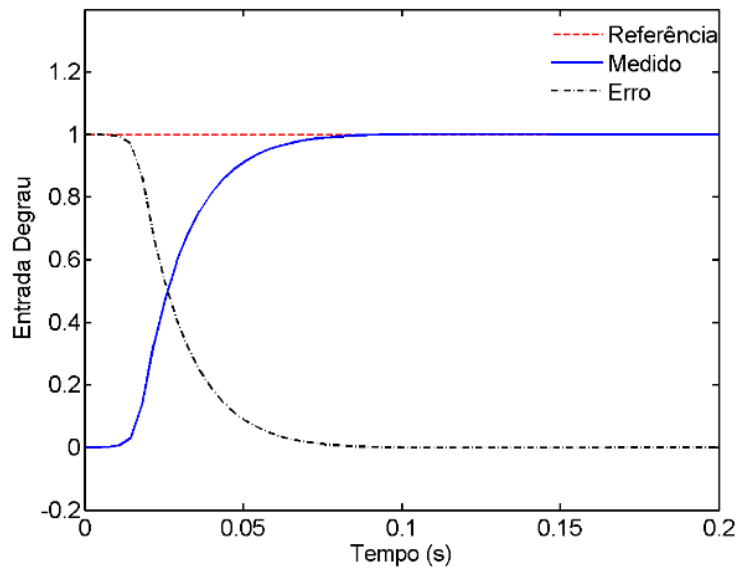


Figura 40 - Controle de corrente

Fonte: Autoria própria, 2014.

3.3.3 Projeto da Malha de Tensão

A potência recebida pelo conversor do lado da rede pelo modelo dq deve ser igual, desde que as perdas sejam desconsideradas, sendo (VOLTONI, 2007):

$$P_g = \frac{3}{2} V_{dg} \cdot i_{dg} = V_{bar} \cdot i_o \quad (66)$$

Onde:

$$i_o = i_c + i_L \quad (67)$$

A equação que define a corrente no capacitor é:

$$i_c = C \frac{dV_{bar}}{dt} \quad (68)$$

Substituindo (65) e (66) em (67), temos:

$$\frac{dV_{bar}}{dt} i_c = \frac{1}{C} \left(\frac{3v_{dg} \cdot i_{dg}}{2V_{bar}} - i_L \right) \quad (69)$$

A Figura 41 representa as malhas de corrente e tensão, que são baseadas na equação (69):

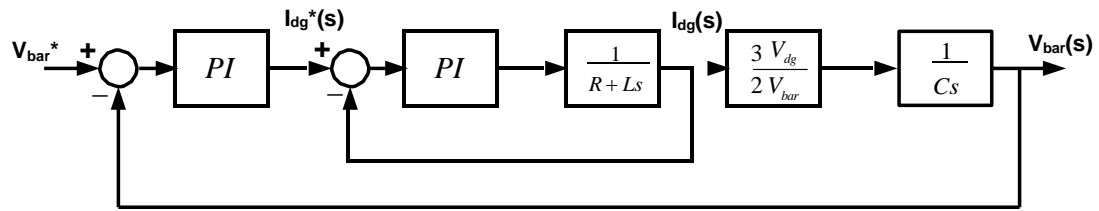


Figura 41 - Malha de controle de corrente e tensão

Fonte: Adaptado de VOLTONI, 2007.

Simplificando a malha de tensão, e considerando a malha de tensão uma dinâmica V_{bar} bem mais lenta que a da malha de corrente, tem a Figura 42:

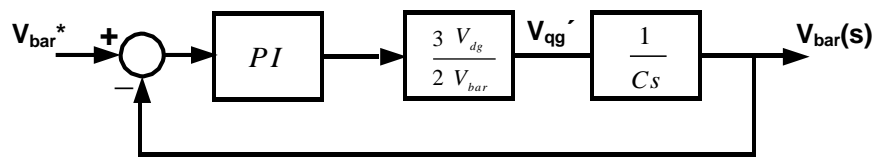


Figura 42 - Malha de tensão simplificada

Fonte: Adaptado de VOLTONI, 2007.

Aplicando Métodos do Lugar das Raízes para ajustar o controlador (BAZANELLA, 2005), replicam-se os cálculos da malha de corrente para a malha de tensão e atribuindo $Z = -2$ teremos:

Planta do sistema:

$$G_{Pl}(s) = \frac{1}{Cs} = \frac{1}{5300\mu F s} \quad (70)$$

Planta do controlador:

$$G(s) = \frac{s+2}{c s} \quad (71)$$

Para determinar o ganho K , pode-se fazer uma escolha simplificada, que é alocar o zero do controlador na posição ($s = -2,5$), em seguida usa a equação característica do sistema de malha fechada (BAZANELLA, 2005), conforme a figura 43 e o desenvolvimento analítico da equação (72):

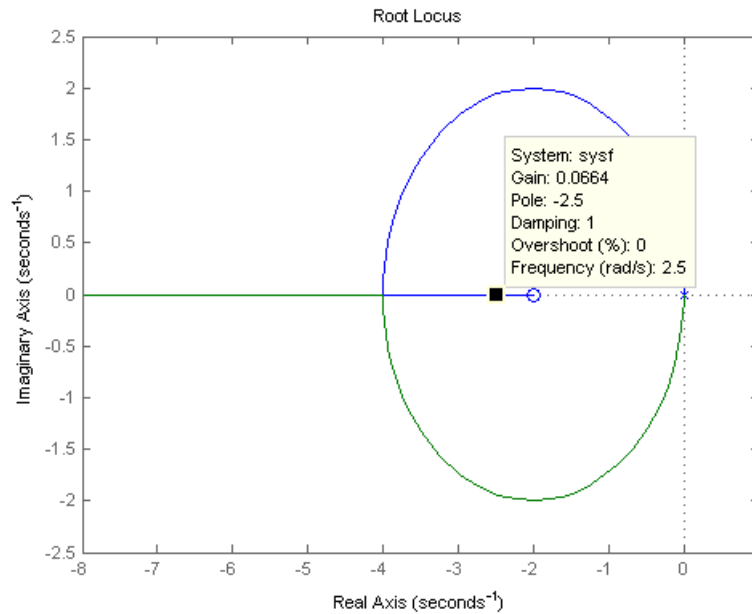


Figura 43 - Gráfico Root Locus

Fonte: Autoria própria, 2013.

$$|K \times G_p \times G_c|_{s=-2.5} = 1 \Leftrightarrow K = 0.06625 \quad (72)$$

Portanto, K_p e K_i serão obtidos a partir do ganho K e da planta do controlador G_c (71), obtém-se:

$$K \times G_c(s) \Leftrightarrow \frac{0.06625s + 0.1325}{s} \quad (73)$$

onde:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} = \frac{0.06625s + 0.1325}{s} \quad (74)$$

Com a comparação entre as equações em (74), teremos $K_p = 0.06625$ e $K_i = 0.1325$. A figura 44 mostra a resposta do sistema para o projeto dos controladores, do barramento CC (V_{bar}) para uma entrada degrau.

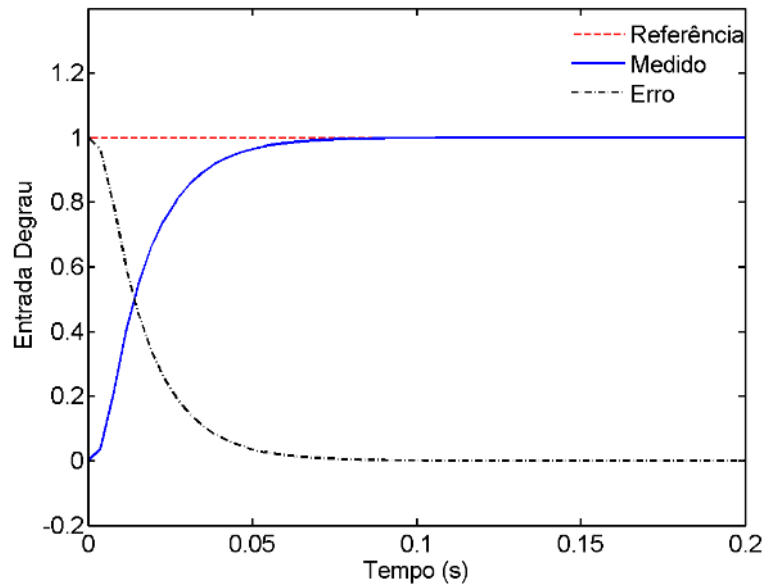


Figura 44 - Controle da tensão

Fonte: Autoria própria, 2013.

3.3.4 Controlador Híbrido (PI + LQR)

O controle com sistema híbrido (PI + LQR) tem o objetivo de melhorar a qualidade do sistema através da técnica de realimentação de estado. Este método utiliza um controlador LQR com ação integral, ao invés de um controlador PI clássico no controle da malha de corrente, porém um integrador é adicionado para eliminar o erro em espaço de estado, conforme a figura 45.

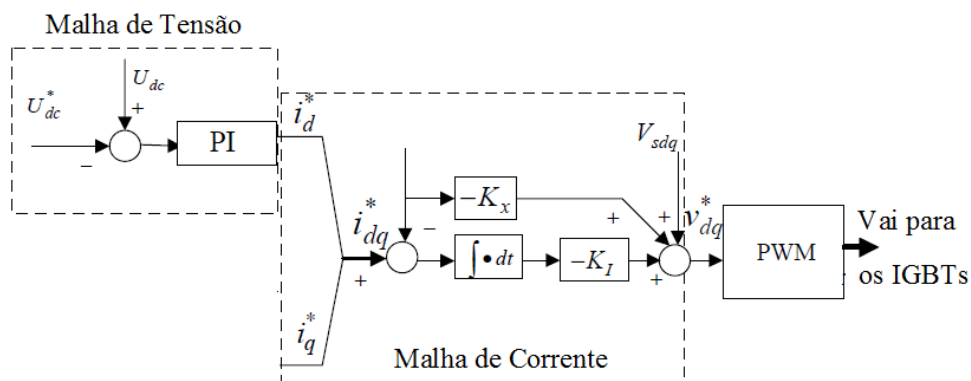


Figura 45 - Diagrama de blocos do controle PI + LQR

Fonte: Adaptado de REN et al, 2005.

O Regulador Linear Quadrático (LQR) é um método de controle ótimo, como também é um método de alocação de pólos que permite deslocar para quaisquer posições no plano “s”, de forma que o comportamento dinâmico do sistema possa ter, em princípio, o desempenho que desejar. Este método determina a matriz de ganho de realimentação que minimiza a função custo, a fim de alcançar uma melhor amplitude e reposta de velocidade devido ao esforço do controle (REN et al, 2005, LEITE, 2011 e SANTOS, 2009).

No caso do controle ótimo, temos um sistema dinâmico em (75) e (76), sendo $x(t)$ os estados do sistema, $u(t)$ a entrada do sistema e $y(t)$ a saída.

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (75)$$

$$y = Cx(t) \quad (76)$$

O objetivo é determinar uma lei de controle (77) de modo que atenda a certas especificações, essa lei se dá pela minimização da seguinte função custo (78):

$$u(t) = -Kx(t) \quad (77)$$

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (78)$$

Portanto, o projeto de LQR consiste simplesmente na determinação dos elementos da matriz K . Da equação (78) tem-se que Q é uma matriz real simétrica positiva semidefinida, e R é uma matriz real simétrica positiva definida, essas matrizes controlam o quanto de esforço deve ser atribuído ao controlador. O ganho de realimentação K é obtido através da matriz P que deve satisfazer a conhecida Equação Algébrica de *Riccati* (REN et al, 2005 e OGATA, 2001).

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (79)$$

Sendo,

$$K = R^{-1}B^T P \quad (80)$$

Quando a matriz de realimentação K é obtida, o controlador LQR pode ser facilmente projetado para tornar os estados em aproximadamente zero de forma otimizada, ou seja, reescrevendo a partir das equações 35 e 36 para o projeto em espaço de estados, no modelo das equações 75 e 76, sem a malha de tensão, têm-se: (REN et al, 2005)

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (81)$$

Sendo os estados em (82), as entradas em (83) e as saídas em (84):

$$x = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (82)$$

$$u = \begin{bmatrix} v_{dg} - V_{d1} \\ v_{qg} - V_{q1} \end{bmatrix} \quad (83)$$

$$y = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (84)$$

Para conseguir erro zero em espaço de estados, um integrador é inserido na malha de controle, e o sistema original passa a ser aumentado incluindo os novos erros no sistema de estados. (REN et al, 2005, LEITE, 2011 e SANTOS, 2011).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}_I(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e_I(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (85)$$

A partir da equação 85 tem que,

$$u(t) = -K(t) \begin{bmatrix} x(t) \\ e_I(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x(t) & K_I(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e_I(t) \end{bmatrix} \quad (86)$$

Reescrevendo a função custo no formato da equação (86), observa-se que o novo regulador LQR tem o objetivo de minimizar os erros com e_I .

$$J = \int_0^1 e^T(t) e(t) + u^T(t) R u(t) dt$$

$$J = \int_0^1 x^T(t) e_I^T(t) \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e_I(t) \end{bmatrix} + u^T(t) R u(t) dt \quad (87)$$

Na equação 87, observa-se que apenas a matriz de ponderação R é mostrada, isso porque a matriz resultante de realimentação depende da relação de R e Q . Como as correntes de eixo dq são simétricas a matriz de ponderação R pode se escolhida como:

$$R = \begin{bmatrix} r & 0 \\ 0 & r \end{bmatrix} \quad (88)$$

3.3.5 Controlador LQR

Para o sistema controlado somente por LQR, o inversor conectado a rede elétrica tem o seguinte diagrama equivalente, como mostra a figura 46.

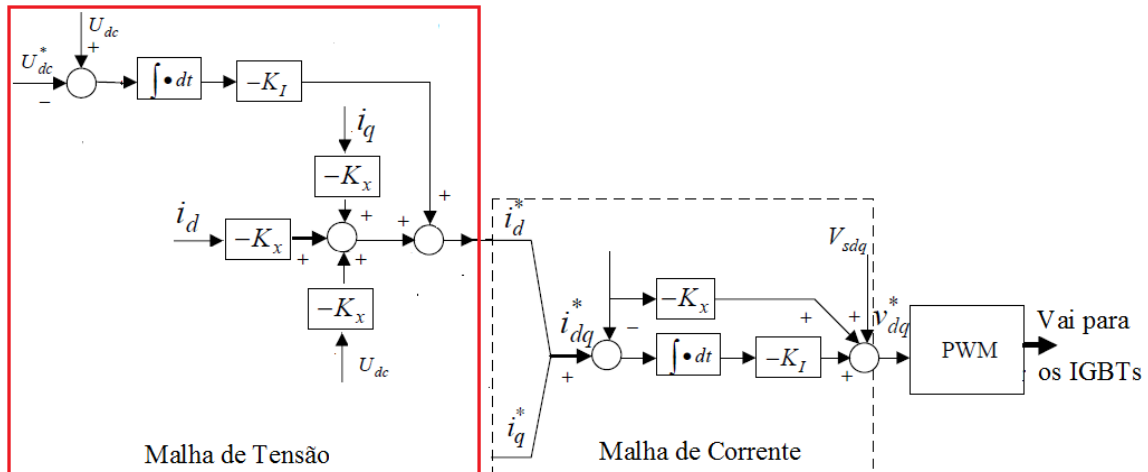


Figura 46 - Diagrama de blocos do controlador LQR

Fonte: Adaptado de REN et al, 2005.

Para este diagrama, o seu novo desenvolvimento matemático parte da figura 36, onde se obteve as equações 35 e 36, e agora se têm as seguintes equações em função das derivadas das correntes I_{dq} .

$$\frac{d}{dt} i_{dg} = -\frac{R}{L} i_{dg} + \omega i_{qg} + \frac{1}{L} (V_{dg} - v_{dg}) \quad (89)$$

$$\frac{d}{dt} i_{qg} = -\frac{R}{L} i_{qg} - \omega i_{dg} + \frac{1}{L} (V_{qg} - v_{qg}) \quad (90)$$

Em seguida as correntes e tensões no barramento CC são encontradas e representadas pelas seguintes equações, conforme a figura 47 (PINTO, 2007):

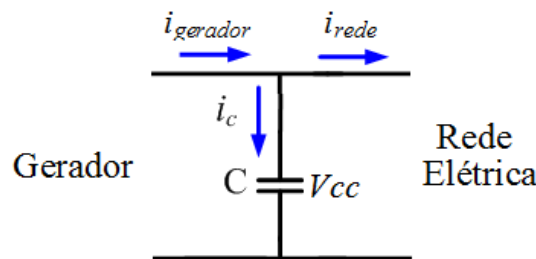


Figura 47 - Sentido das correntes no barramento CC

Fonte: Autoria própria, 2013.

$$i_C = i_{gerador} - i_{rede} \quad (91)$$

$$i_C = C \frac{dV_{cc}}{dt} \quad (92)$$

$$C \frac{dV_{cc}}{dt} = i_{gerador} - i_{rede} \quad (93)$$

sendo $i_{gerador}$ e i_{rede} expressas pelas seguintes equações:

$$i_{gerador} = \frac{P_{gerador}}{V_{cc}} \quad (94)$$

$$i_{rede} = \frac{P_{rede}}{V_{cc}} \quad (95)$$

Substituindo as equações 95 em 93, tem:

$$C \frac{dV_{cc}}{dt} = i_{gerador} - i_{rede} \quad (96)$$

Como $P_{rede} = v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q$, logo resulta em:

$$\frac{dV_{cc}}{dt} = \frac{P_{gerador}}{C} - \frac{v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q}{C \cdot V_{cc}} \quad (97)$$

Finalmente podemos representar a dinâmica do sistema, resultando em uma representação em espaço de estados como se caracteriza o controle LQR, através das equações 35, 36 e 97 distribuídas matricialmente.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{CC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & 0 \\ -\omega & -\frac{R}{L} & 0 \\ -\frac{v_d}{C \cdot V_{CC}} & -\frac{v_q}{C \cdot V_{CC}} & \frac{V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q}{C \cdot V_{CC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{CC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{i_d}{C \cdot V_{CC}} & -\frac{i_q}{C \cdot V_{CC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dg} - v_{d1} \\ V_{qg} - v_{q1} \end{bmatrix} \quad (98)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & 0 \\ -\omega & -\frac{R}{L} & 0 \\ \frac{v_d}{C \cdot V_{CC}} & -\frac{v_q}{C \cdot V_{CC}} & \frac{V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q}{C \cdot V_{CC}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{i_d}{C \cdot V_{CC}} & -\frac{i_q}{C \cdot V_{CC}} \end{bmatrix} \quad (99)$$

3.4 Método do Sincronismo

As fontes de gerações de energia precisam operar sincronizadas quando conectados à rede elétrica. Na literatura (GUO, 2011), são descritos alguns métodos, tais como: método de sincronização em malha aberta e método de sincronização em malha fechada, também conhecido como *Phase Locked Loop* (PLL) ou laço de sincronização de fase.

Neste trabalho será utilizado um dos modelos mais utilizados de PLL para o inversor conectado à rede elétrica através da teoria das potências instantâneas (*p*-PLL e *q*-PLL), já que isto se torna um grande desafio ao sistema eólico (LOPES, 2006 e BEZERRA, 2010).

As figuras 48 e 49 apresentam os circuitos PLL (*p*-PLL e *q*-PLL) de sincronização.

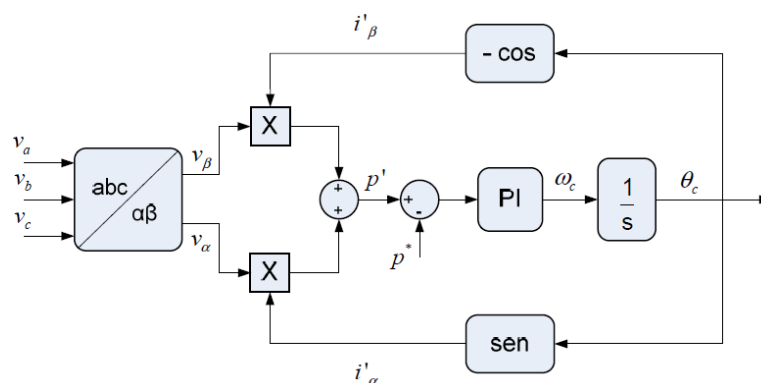


Figura 48 - Circuito *p*-PLL

Fonte: Adaptado de Bezerra, 2010.

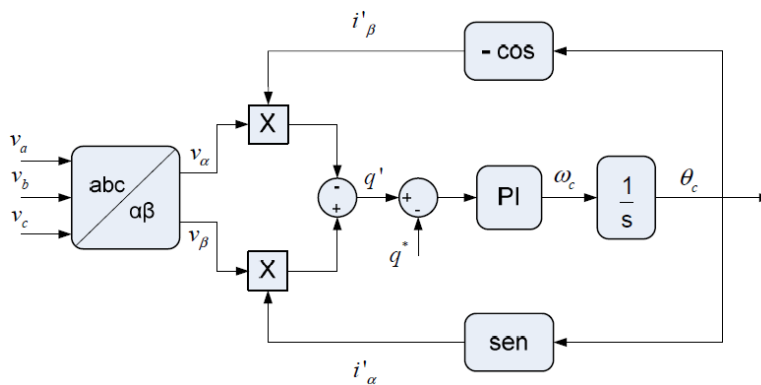


Figura 49 - Circuito *q*-PLL

Fonte: Adaptado de Bezerra, 2010.

A partir das figuras, as tensões instantâneas v_α e v_β são obtidas pela transformada de Clark em função das tensões instantâneas da rede elétrica. Com as correntes instantâneas fictícias i'_α e i'_β , nas coordenadas α - β pode-se calcular p' (W) e q' (Var) através de:

$$\begin{bmatrix} p' \\ q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix} \quad (100)$$

De acordo com Lopes (2006) e as figuras 46 e 47, tem-se que o erro gerado entre a comparação do sinal de potência p^* e q^* de referência e o sinal de potência p' e q' medido alimenta um controlador PI, cuja saída é a frequência angular detectada do sistema (ω_c). Detectado ω_c é usada para alimentar um bloco integrador que é usado para gerar o sinal (θ_c) de sincronismo com a de rede elétrica, que θ_c é dado por:

$$\theta_c = \omega_c t + \phi \quad (101)$$

Ainda em Lopes (2006) e Bezerra (2010), é demonstrado que matematicamente não existe diferenças nos dois modelos de PLL, porém cada circuito vem acompanhado dos seus prefixos p ou q em função da potência real ou imaginária instantânea usada como sinal de realimentação respectivamente.

3.5 Considerações Finais

O sistema de geração eólica conectada a rede elétrica necessita de controladores e um método de sincronização que ajudem na conexão com a rede elétrica, evitando diversos problemas à concessionária e ou consumidores.

Neste trabalho foram apresentados os respectivos controladores PI, híbrido (PI+LQR) e LQR e suas modelagens, verificando que houve um melhor desempenho quando inserido a teoria do LQR (controladores).

Por fim, apresentou uma metodologia de sincronismo bastante utilizada (p -PLL e q -PLL), garantindo à estabilidade e controle do sistema conectado a rede elétrica.

Capítulo 4 - Análise dos Resultados

Este capítulo apresenta resultados em regime permanente e em regime transitório para as simulações do sistema eólico CA/CC/CA, através do *software* PSIM® do fabricante *Powersim Inc.* versão 9.1.

A seguir serão apresentadas as principais formas de onda de tensões e correntes para o retificador, conversor *boost* e inversor conectado à rede elétrica sendo controlado por: controlador PI, controle híbrido (PI + LQR) e somente por controle LQR.

4.1 Resultados em Regime Permanente

Nestas condições serão apresentados os resultados em regime permanente para o conversor CA/CC (retificador), conversor CC/CC (*boost*) e para o conversor CC/CA (inversor). Será utilizado o controlador PI e considerado um vento com velocidade constante de 12m/s, e que a rede elétrica não oferece distúrbios ao sistema eólico.

Para o conversor CA/CC, observa-se a seguinte forma de onda da tensão de entrada do retificador trifásico na figura 50.

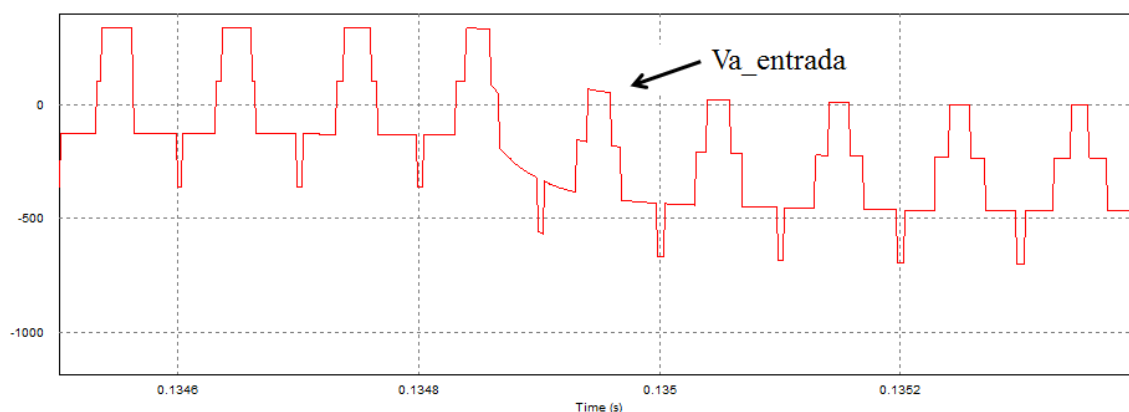


Figura 50 - Forma de onda da tensão de entrada do retificador trifásico.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Para a figura 51, tem a forma de onda da corrente no diodo do retificador trifásico não-controlado.

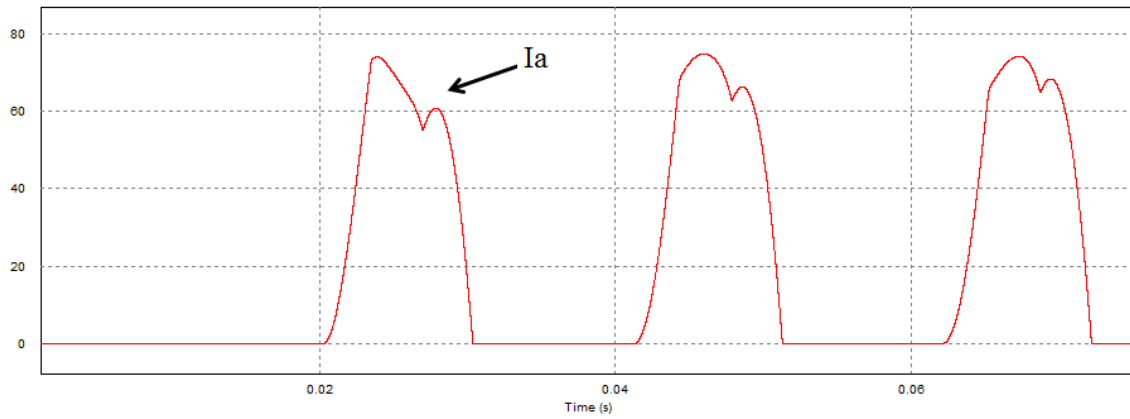


Figura 51 - Forma de onda da corrente no diodo do retificador trifásico.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Pelo gráfico da figura 52, verifica-se que a tensão de saída do retificador trifásico não-controlado é mantida constante em uma tensão média de 337V, que será a tensão de entrada (V_i) do conversor *boost*.

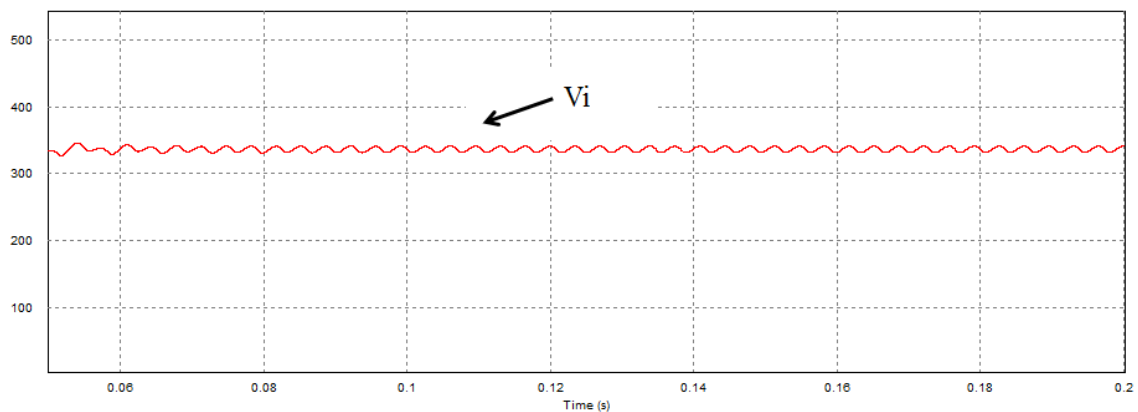


Figura 52 - Forma de onda da tensão CC de saída do retificador.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Com a tensão de entrada do conversor *boost* constante, percebe-se a corrente do indutor (I_L) também constante, em uma corrente média de 71A, conforme a figura 53.

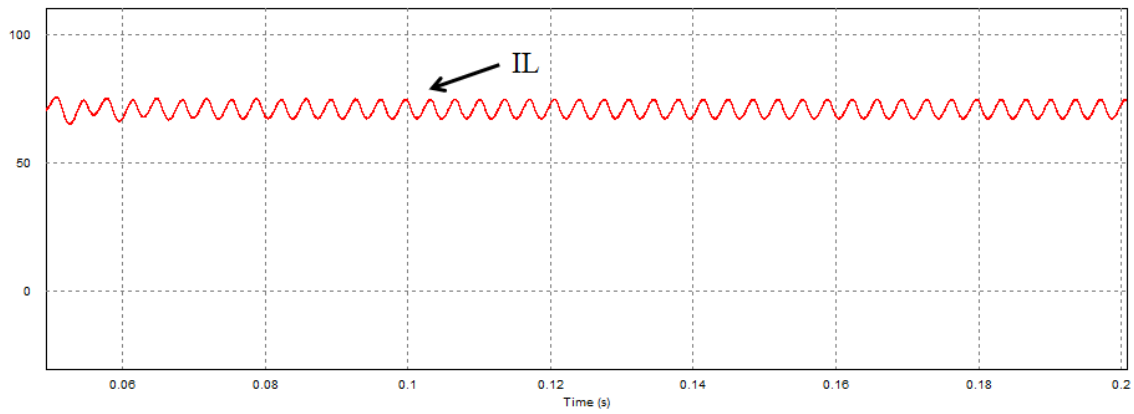


Figura 53 - Forma de onda da corrente no indutor do conversor boost.

Fonte: Autoria própria, 2014.

A forma de onda da tensão e corrente na chave à IGBT de alta frequência do conversor *boost* pode ser visualizada nas figuras 54 e 55.

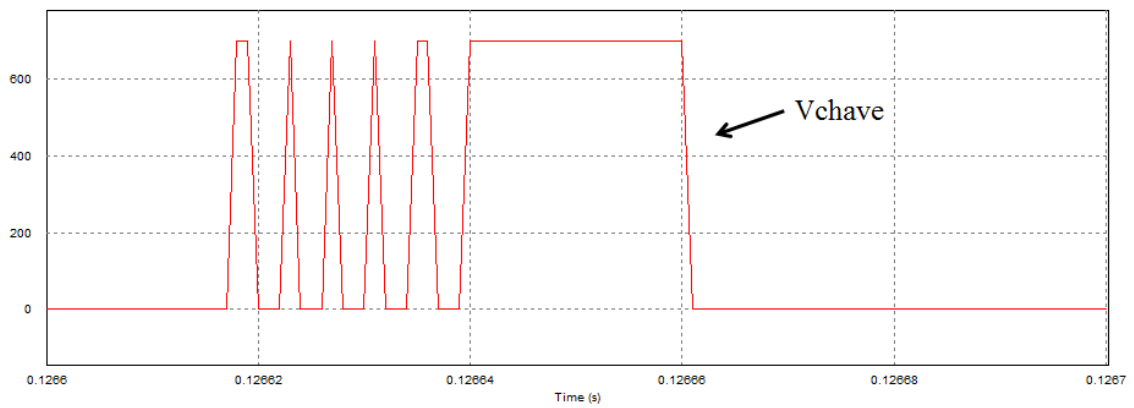


Figura 54 - Forma de onda da tensão na chave à IGBT de alta frequência.

Fonte: Autoria própria, 2014.

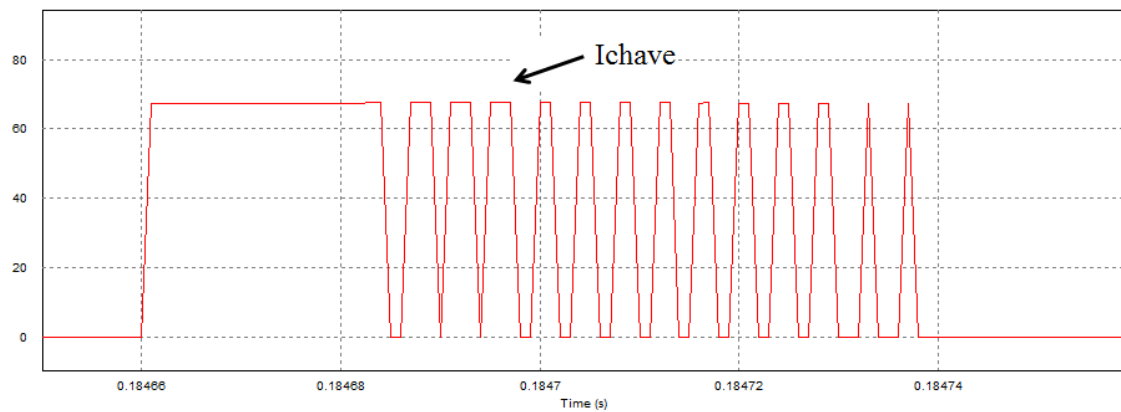


Figura 55 - Forma de onda da corrente na chave à IGBT de alta frequência.

Fonte: Autoria própria, 2014.

As figuras 56 e 57 apresentam as formas de onda da tensão e da corrente no diodo do conversor *boost*.

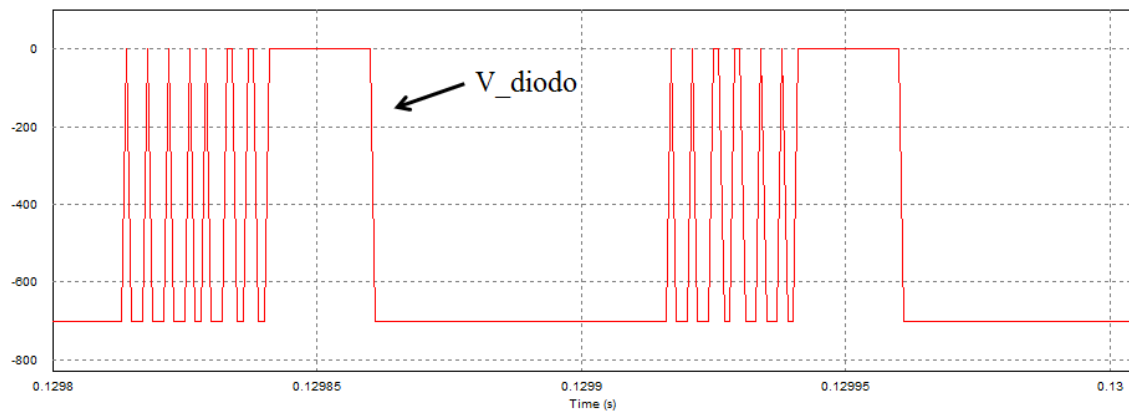


Figura 56 - Forma de onda da tensão no diodo do conversor boost.

Fonte: Autoria própria, 2014.

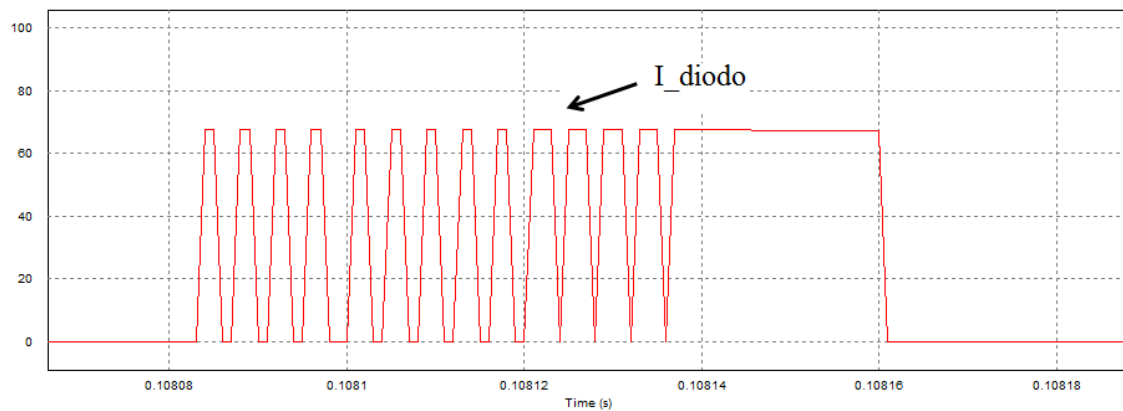


Figura 57 - Forma de onda da corrente no diodo do conversor boost.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Para o inversor conectado à rede elétrica, a figura 58 ilustra o barramento CC sendo controlado em um valor médio de 700 V e conseqüentemente o controle do fluxo de energia ativa armazenada no capacitor. A variação da tensão está em aproximadamente 1V, ou seja, de 609V à 701V.

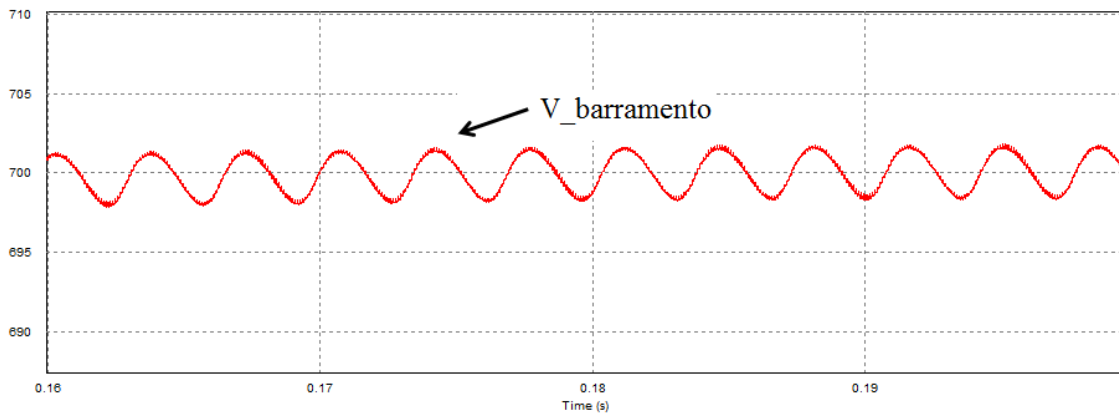


Figura 58 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

As figuras 59 e 60 demonstram a forma de onda da tensão e corrente na chave à IGBT do inversor conectada à rede elétrica.

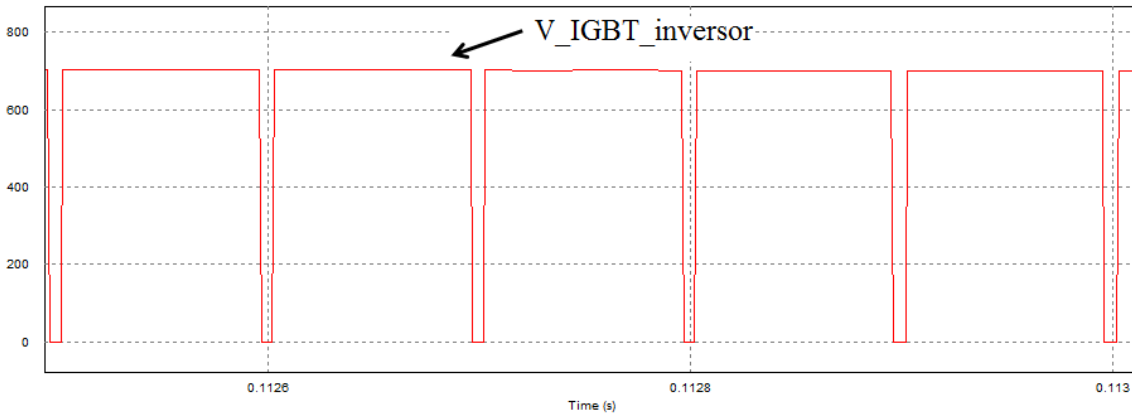


Figura 59 - Forma de onda da tensão na chave à IGBT do inversor.

Fonte: Autoria própria, 2014.

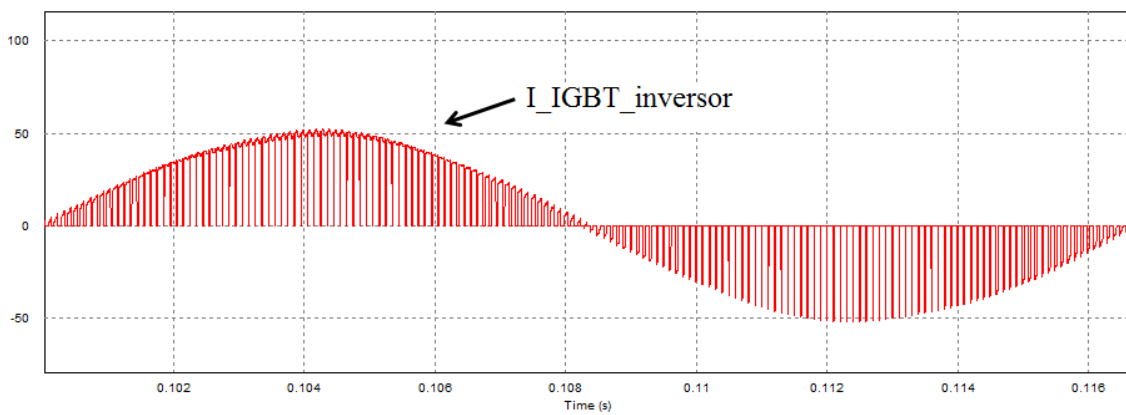


Figura 60 - Forma de onda da corrente na chave à IGBT do inversor.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Para a formação da tensão de saída do inversor, que consiste na estratégia de disparo dos dispositivos de potência (semicondutores), é utilizada a técnica de PWM. A abertura e fechamento destes semicondutores de potência proporcionam as seguintes formas de ondas, conforme apresenta a figura 61.

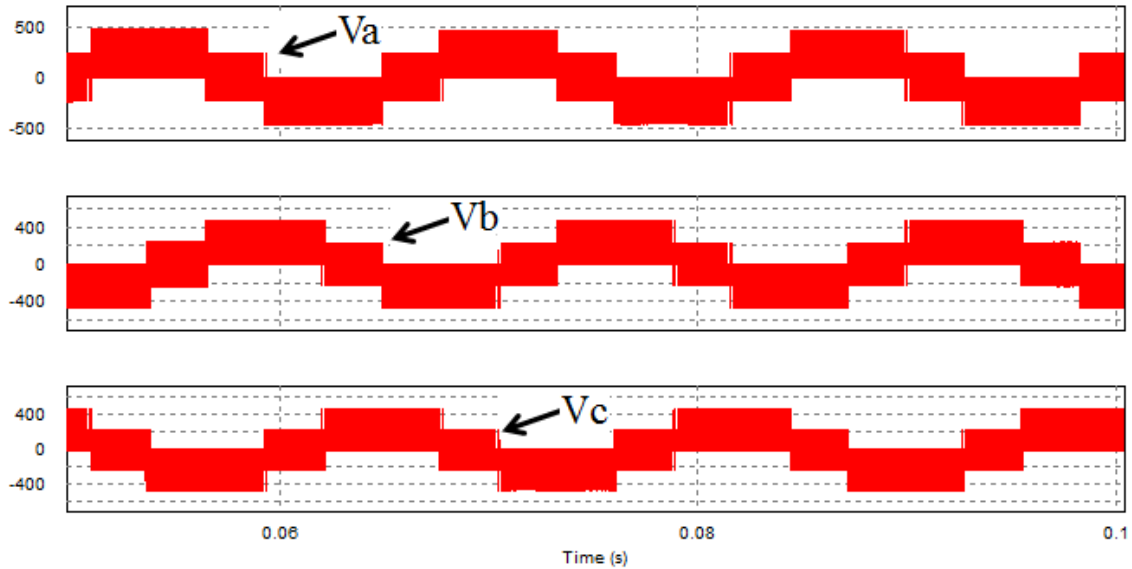


Figura 61 - Tensões de saída do inversor.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Na figura 62 é apresentada em detalhes a tensão, corrente injetada na rede elétrica em uma fase, de modo que se consegue um fator de potência unitário e uma potência reativa injetada na rede nula.

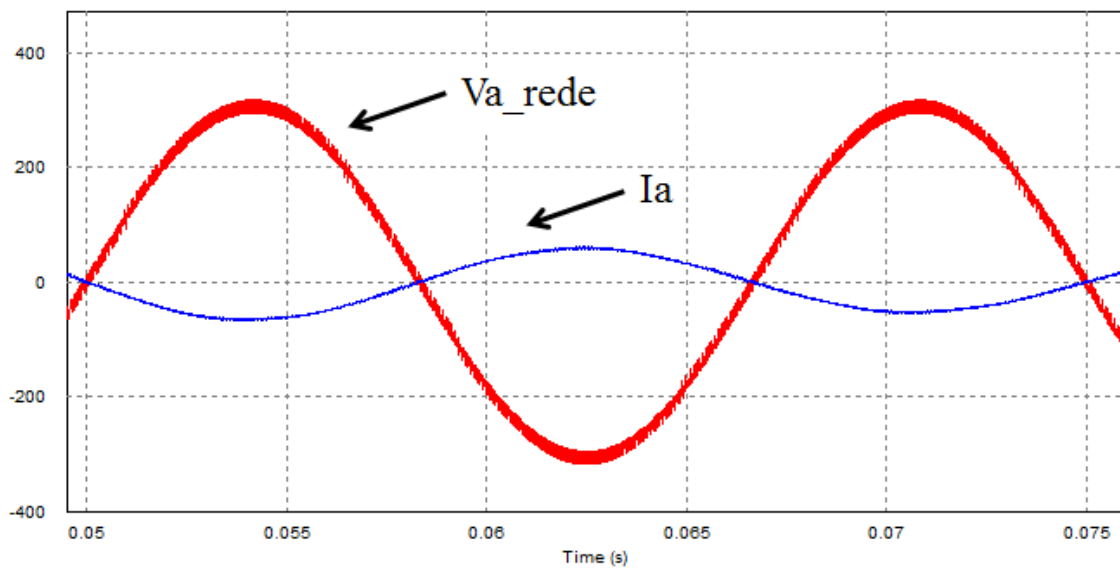


Figura 62 - Forma de onda da tensão e a corrente injetada na rede elétrica.

Fonte: Autoria própria, 2014.

4.2 Regime Transitório

Para verificar o comportamento do sistema eólico em regime transitório, sua dinâmica e a robustez dos controladores, foram realizados os seguintes testes: máxima extração de potência (MPPT), variações da velocidade do vento, afundamento monofásico, trifásico e desbalanceamento da rede elétrica.

As simulações com o conversor CC/CC (*boost*) e CC/CA (inversor) do lado da rede elétrica, tem como objetivo comprovar o controle do barramento CC, da corrente e potências ativa e reativa injetada na rede elétrica através das técnicas de controle.

4.2.1 MPPT

Com a finalidade de obter a máxima extração de potência com as respectivas variações de velocidade do vento, este teste utiliza um controlador PI e sofre uma variação em degrau decrescente para as velocidades do vento de 12m/s \rightarrow 10m/s \rightarrow 8m/s \rightarrow 6m/s, como ilustra a figura 63. Em função disto, a tensão de entrada (V_i) e a corrente no indutor (I_L) do conversor *boost* sofrem uma variação, de acordo com as figuras 64.

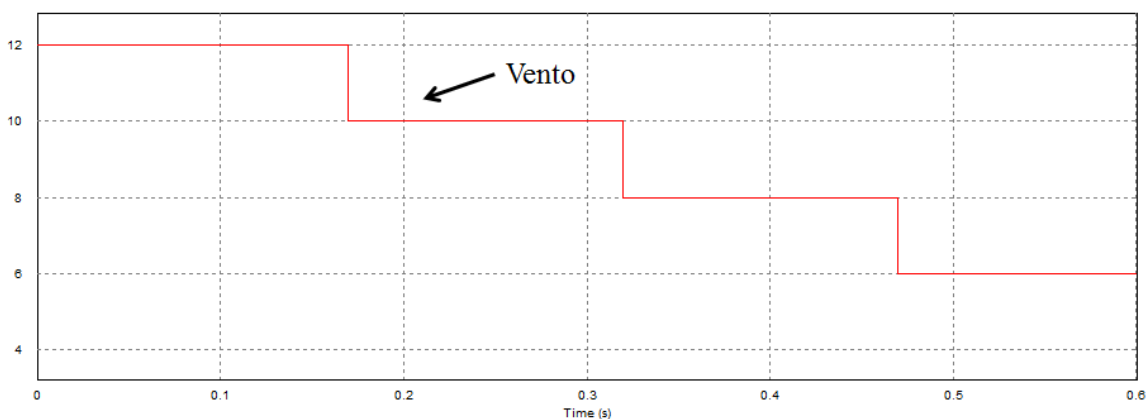


Figura 63 - Variação da velocidade do vento.

Fonte: Autoria própria, 2014.

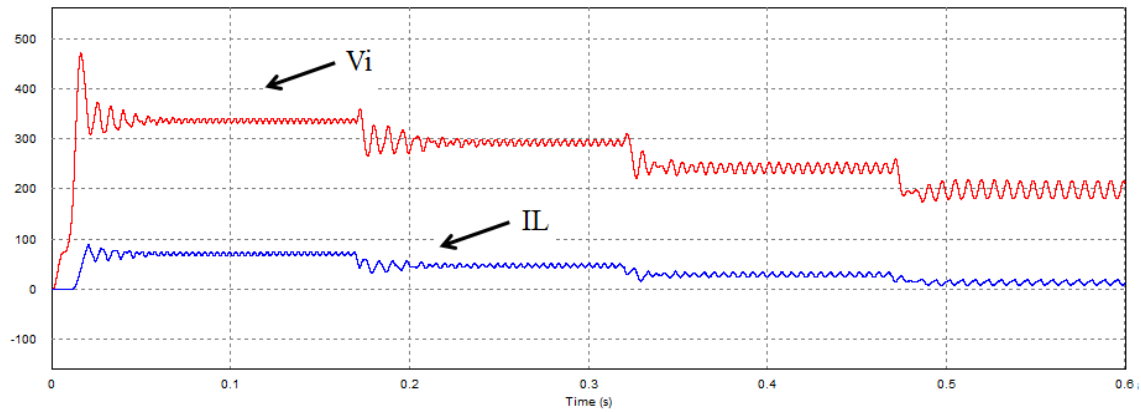


Figura 64 - Forma de onda da tensão de entrada e da corrente no indutor do conversor *boost*.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Para fins de validação, é ilustrada uma tabela 6 com os valores médios de entrada do conversor *boost* por simulação (velocidade do vento, potência gerada, tensão, correntes) e os valores calculados de corrente para a entrada do *boost*.

Tabela 6 - Valores de vento, potência, tensão, corrente simulada e corrente calculada

Velocidade do vento (m/s)	Potência do gerador (kW)	Tensão de entrada do boost (V)	Corrente simulada (A)	Corrente teórica (A)
12	24	337	70,48	71,21
10	14	293	47,28	47,78
8	7	244	29,11	29
6	2683	198	14,03	13,55

Fonte: Autoria própria, 2014.

Analisando a tabela 6 e as figuras 63 e 64, percebe-se que a corrente nominal diminui, ou seja, na perda de velocidade o gerador perde potência de geração. Dessa forma a tensão e a corrente também perdem na entrada do conversor *boost*, tensão e corrente. Estes testes mostram que o sistema é capaz de manter a tensão no barramento constante, menores oscilações, menores *overshoot*, ainda que sofra variações na velocidade do vento, conforme a figura 65.

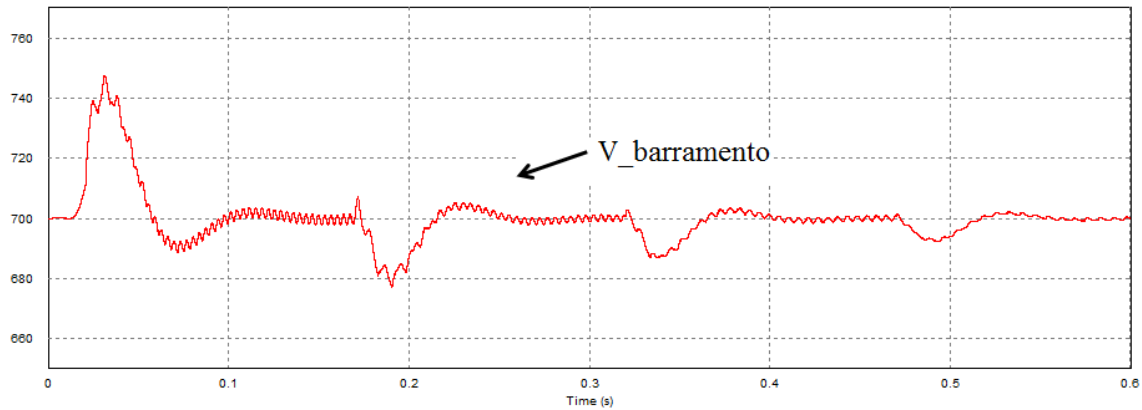


Figura 65 - Tensão no barramento CC sobre variações do vento.

Fonte: Autoria própria, 2014.

4.2.2 Variação da Velocidade do Vento

Para a variação do vento na turbina e a análise dos resultados com as técnicas de controle aplicadas ao conversor CC/CA (inversor), as simulações foram realizadas com uma variação de 150ms, utilizando as seguintes sequências:

- 12m/s → 10m/s → 12m/s
- 12m/s → 8m/s → 12m/s
- 12m/s → 6m/s → 12m/s

4.2.2.1 Controlador PI

Variando inicialmente o vento em 12m/s → 10m/s → 12m/s, são apresentadas as seguintes formas de onda de tensão e corrente, conforme as figuras 66, 67 e 68. De acordo com a figura 66, após uma variação da velocidade do vento o sistema volta a estabilizar no barramento CC em aproximadamente 100ms.

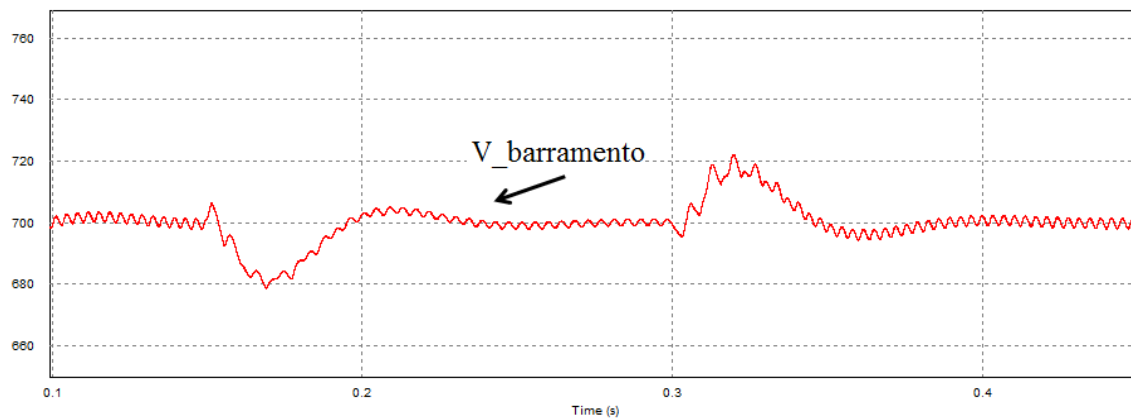


Figura 66 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

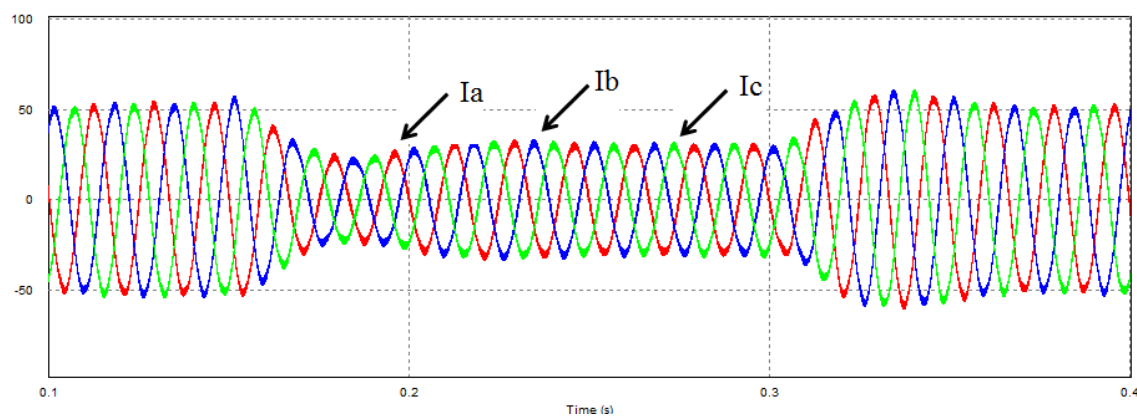


Figura 67 - Forma de onda das correntes de saída do inversor.

Fonte: Autoria própria, 2014.

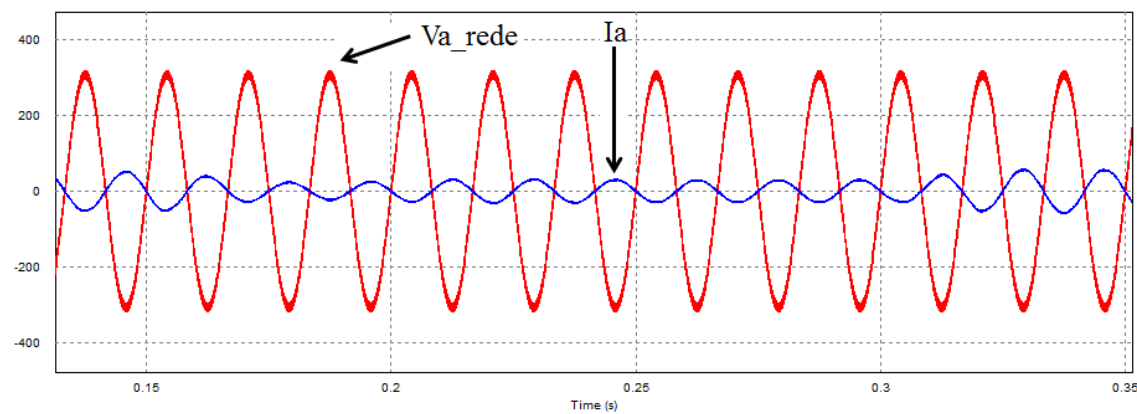


Figura 68 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Aplicando uma variação no vento de 12m/s → 8m/s → 12m/s, as seguintes formas de onda de tensão e corrente são ilustradas, conforme as figuras 69, 70 e 71. O sistema consegue manter o restabelecimento em aproximadamente 130ms.

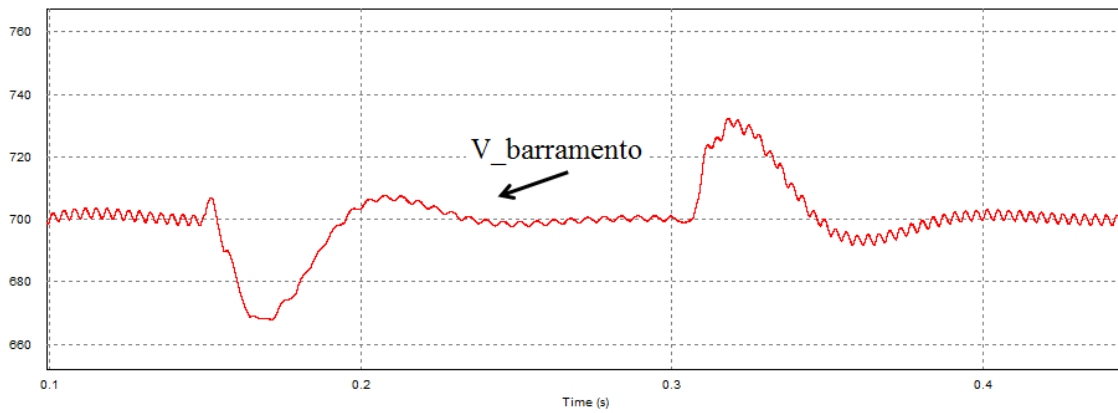


Figura 69 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

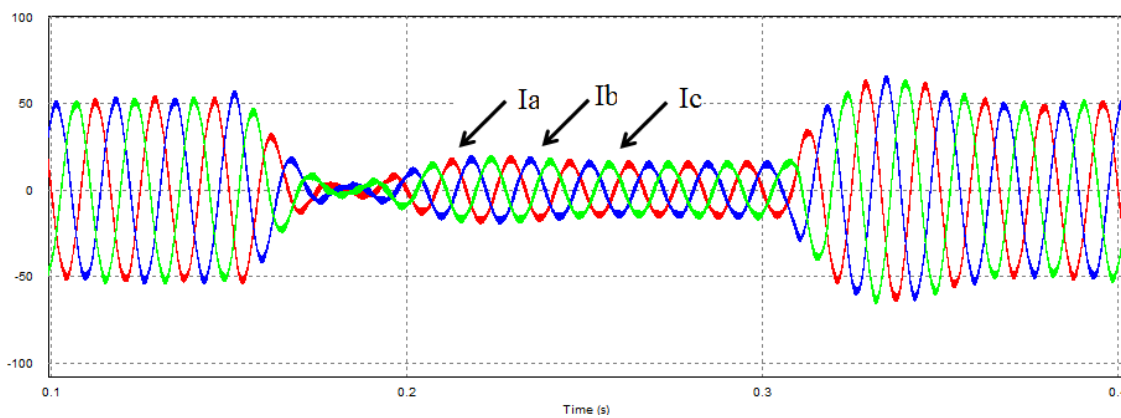


Figura 70 - Forma de onda das correntes de saída do inversor.

Fonte: Autoria própria, 2014.

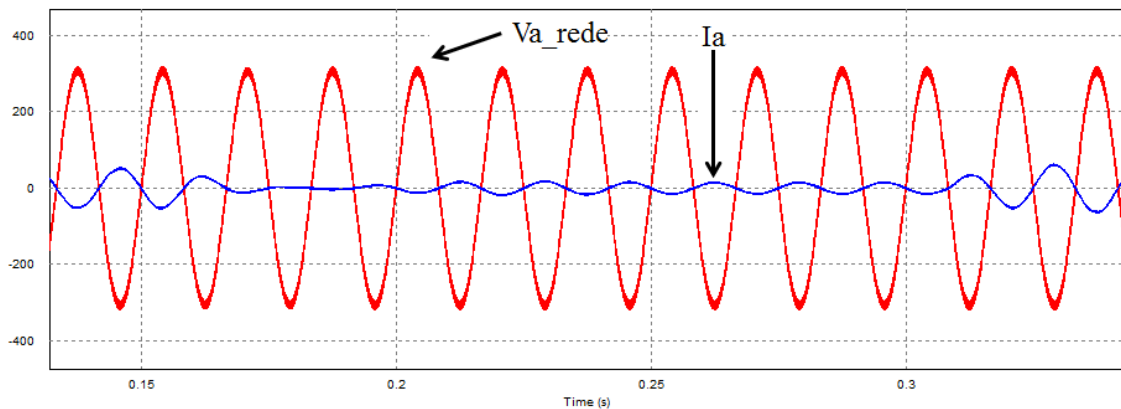


Figura 71 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Com a variação do vento de 12m/s → 6m/s → 12m/s, têm-se as seguintes formas de onda de tensão e corrente, segundo as figuras 72, 73 e 74. Para esta situação o sistema se restabelece em aproximadamente 150ms.

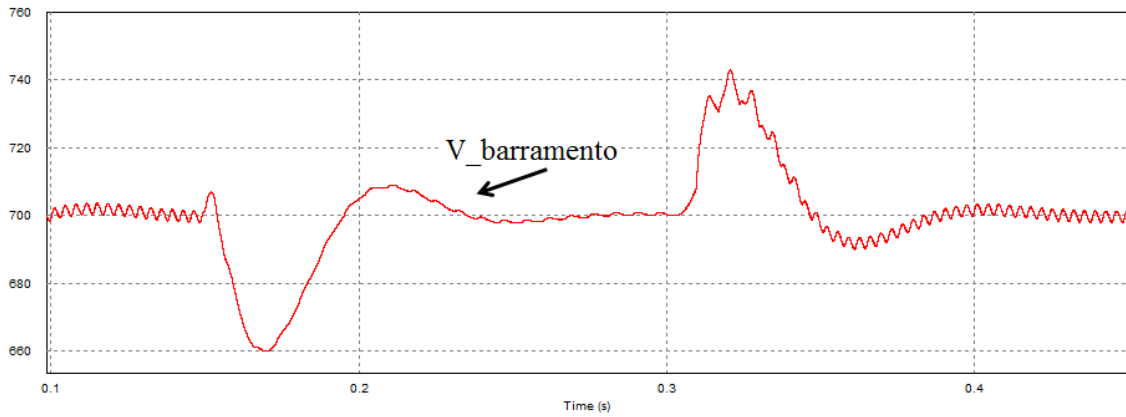


Figura 72 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

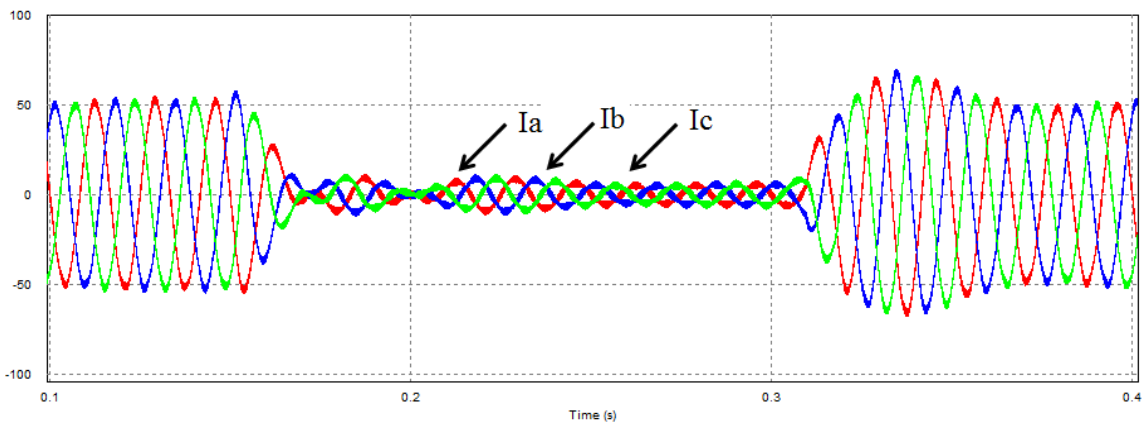


Figura 73 - Forma de onda das correntes de saída do inversor.

Fonte: Autoria própria, 2014.

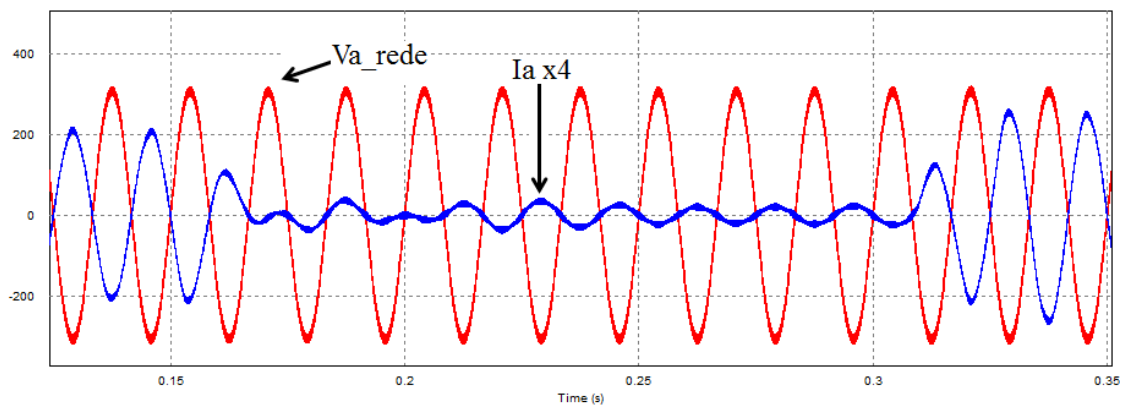


Figura 74 - Forma de onda da tensão e corrente de saída (multiplicada por 4).

Fonte: Autoria própria, 2014.

Comparando as três situações de variações da velocidade do vento para o controle PI com as figuras 66, 69 e 72, percebe-se um aumento do *overshoot* à medida que a velocidade diminui com isso o sistema aumenta seu tempo de restabelecimento, porém garante a tensão constante no barramento CC.

4.2.2.2 Controlador Híbrido (PI + LQR)

Utilizando um sistema de controle híbrido para o inversor, em que as malhas de corrente utilizam o controle ótimo LQR e a malha de tensão o controle PI, têm-se para uma variação do vento de 12m/s \rightarrow 10m/s \rightarrow 12m/s, as seguintes formas de onda de tensão e corrente, conforme as figuras 75, 76 e 77.

De acordo com a figura 75, após uma variação da velocidade do vento o sistema volta a estabilizar em aproximadamente 80ms.

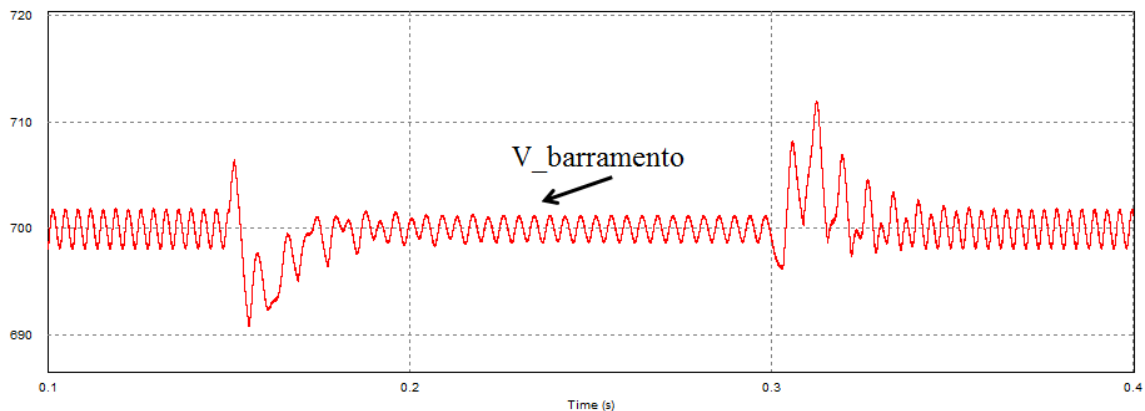


Figura 75 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

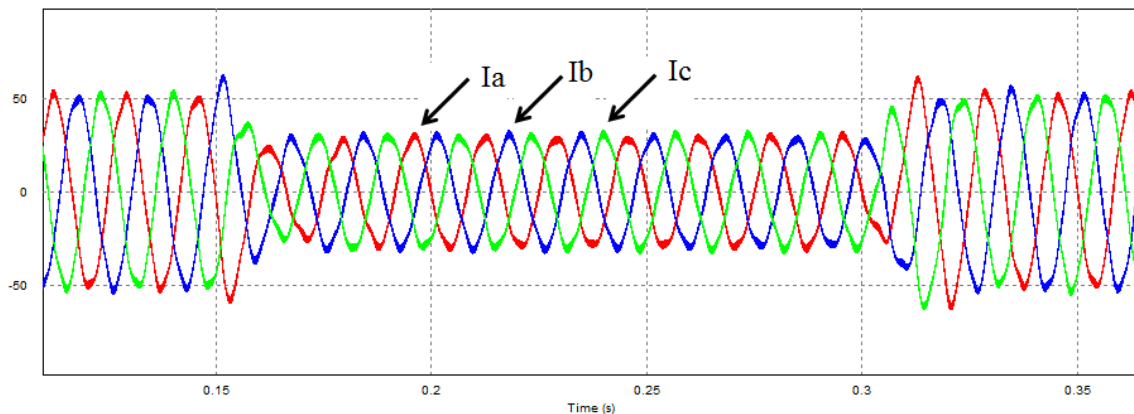


Figura 76 - Forma de onda das correntes de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

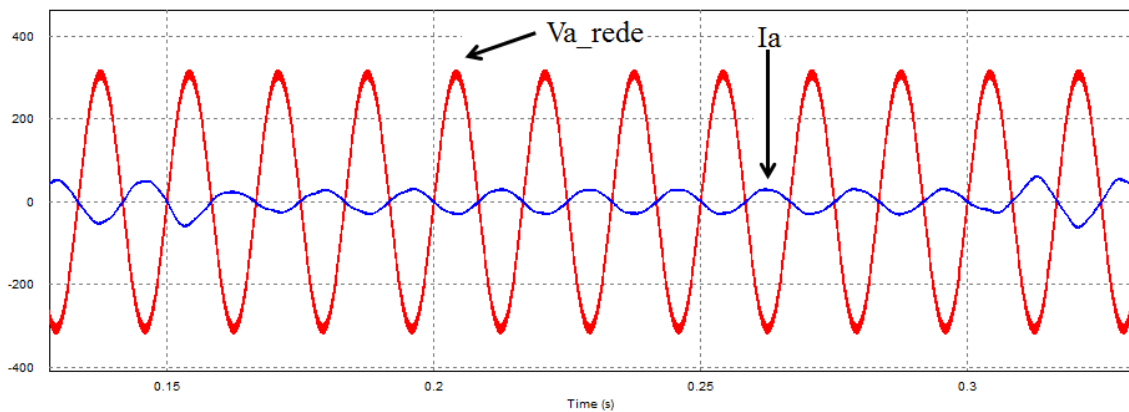


Figura 77 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Utilizando uma variação do vento de 12m/s → 8m/s → 12m/s, são apresentadas as seguintes formas de onda de tensão e corrente, conforme as figuras 78, 79 e 80. Neste caso mantém-se um restabelecimento em aproximadamente 80ms.

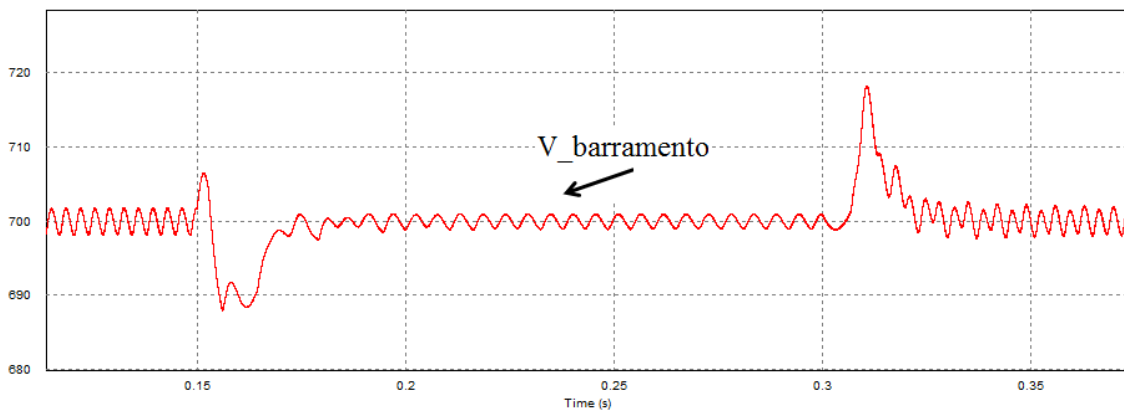


Figura 78 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

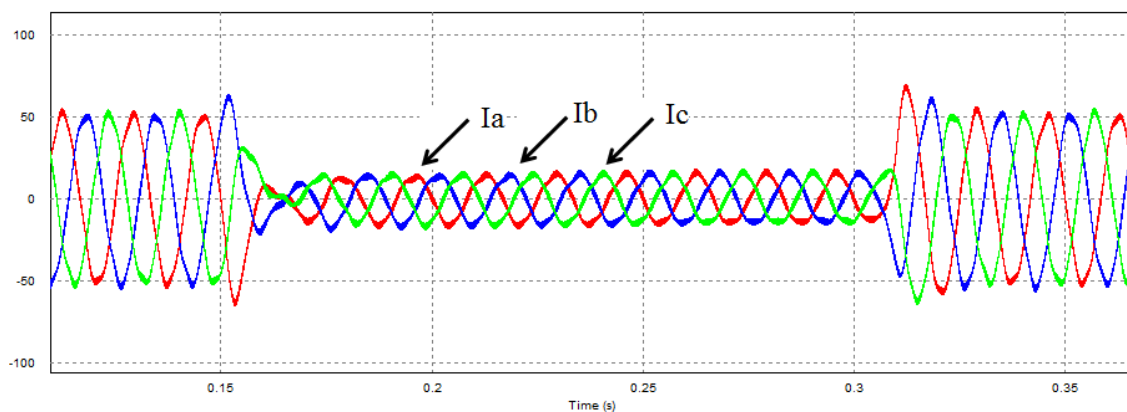


Figura 79 - Forma de onda das correntes de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

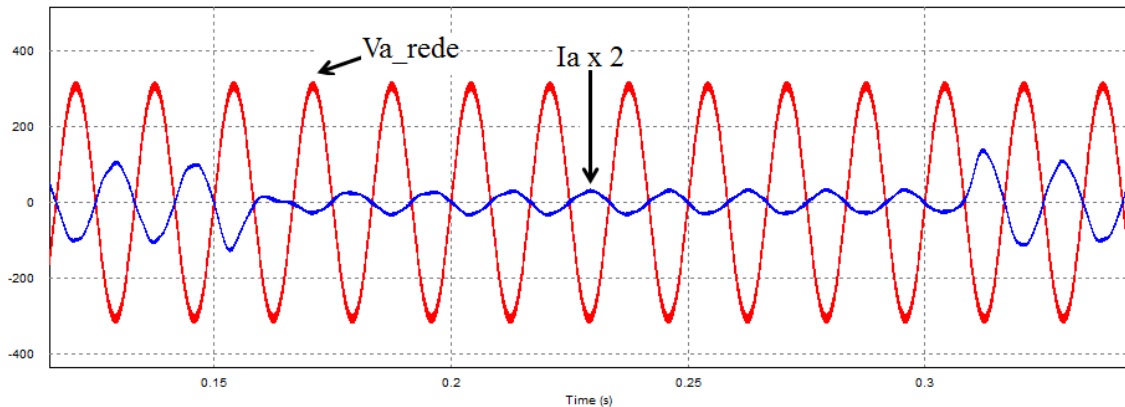


Figura 80 - Forma de onda da tensão e corrente de saída (multiplicada por 2).

Fonte: Autoria própria, 2014.

Por fim, uma variação do vento de 12m/s → 6m/s → 12m/s ilustra as seguintes formas de onda de tensão e corrente, segundo as figuras 81, 82 e 83. O sistema se restabelece em aproximadamente 70ms.

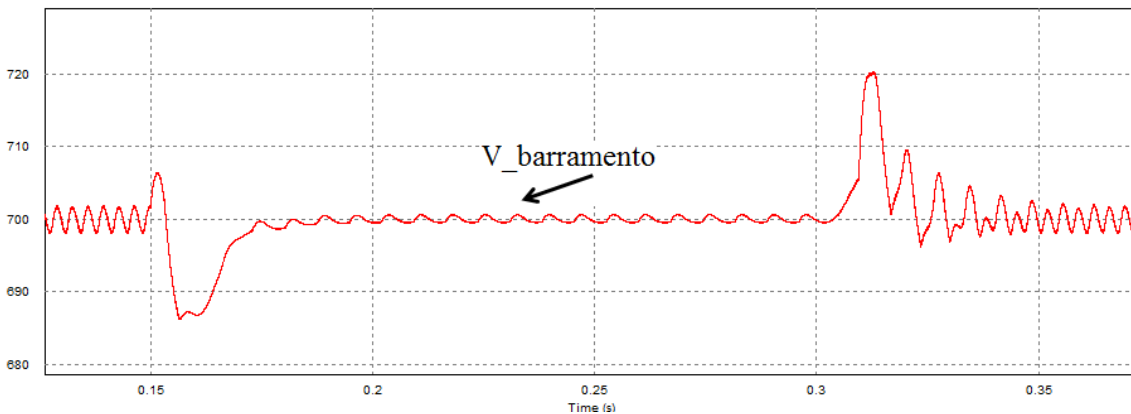


Figura 81 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

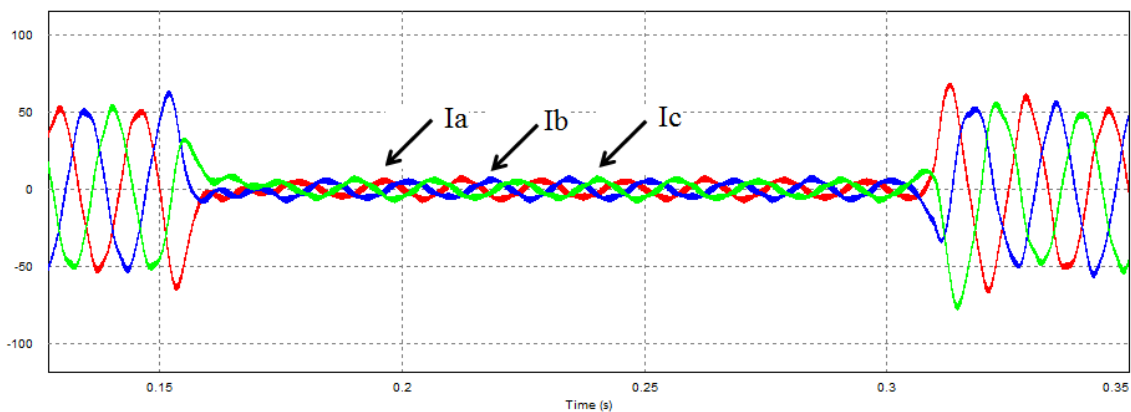


Figura 82 - Forma de onda das correntes de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

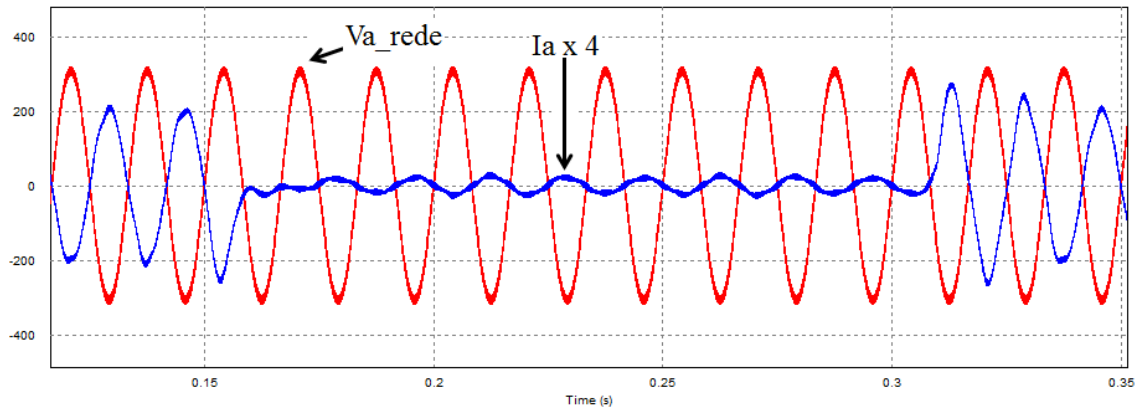


Figura 83 - Forma de onda da tensão e corrente de saída (multiplicada por 4).

Fonte: Autoria própria, 2014.

Comparando as três situações de variações da velocidade do vento para o controle híbrido (PI + LQR), observa-se nas figuras 75, 78 e 81 que houve uma diminuição do *overshoot* e no tempo de restabelecimento à medida que a velocidade diminui, quando comparado com o controle por PI, logo o sistema ainda garante a tensão média constante no barramento CC.

4.2.2.3 Controlador LQR

Utilizando o controle ótimo e as mesmas variações do vento, são apresentadas as seguintes formas de onda de tensão e corrente, conforme as figuras 84, 85 e 86 para 12m/s → 10m/s → 12m/s.

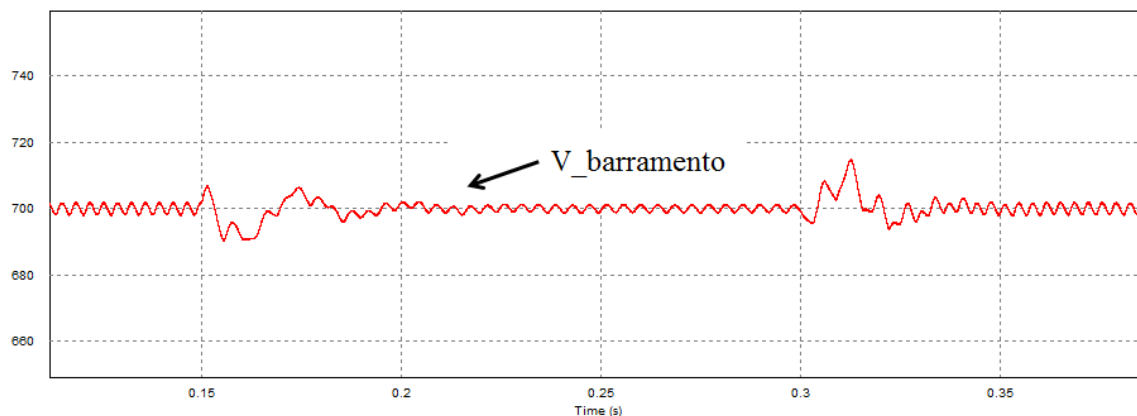


Figura 84 - Forma de onda da tensão da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

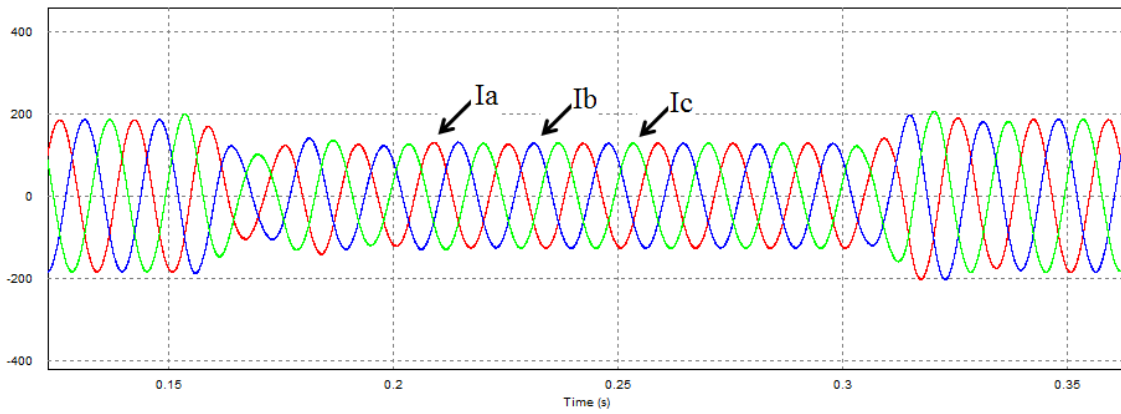


Figura 85 - Forma de onda das correntes de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

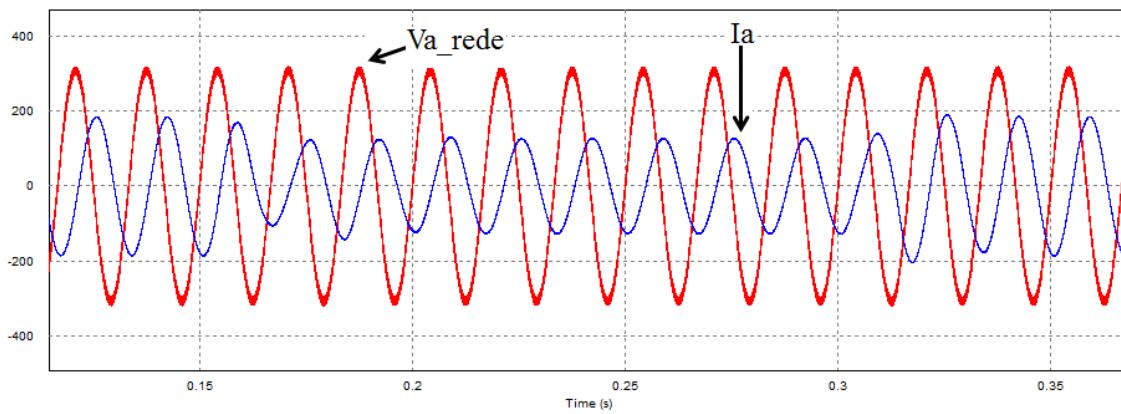


Figura 86 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Agora utilizando 12m/s → 8m/s → 12m/s, têm-se as figuras 87, 88 e 89.

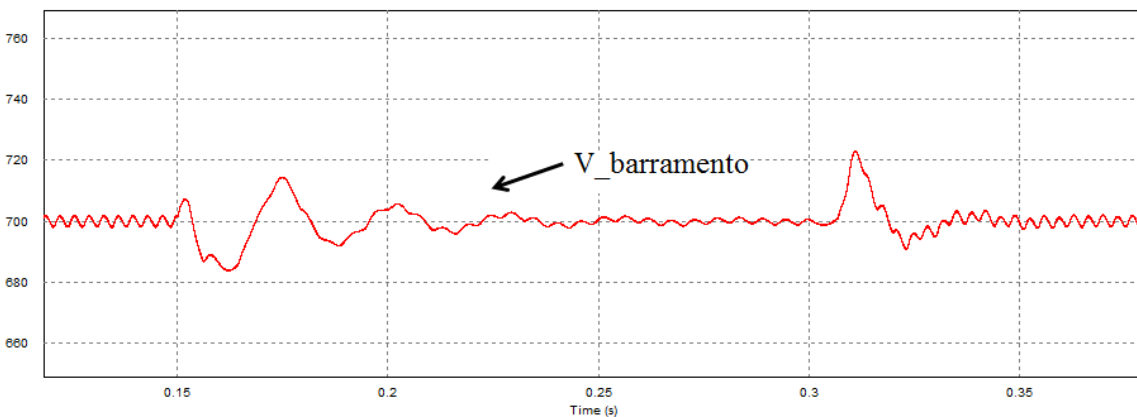


Figura 87 - Forma de onda da tensão do barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

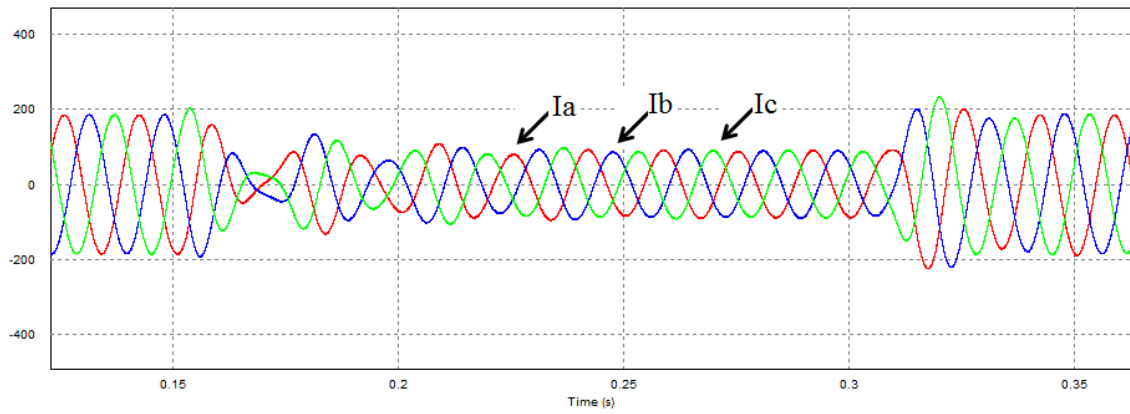


Figura 88 - Forma de onda das correntes de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

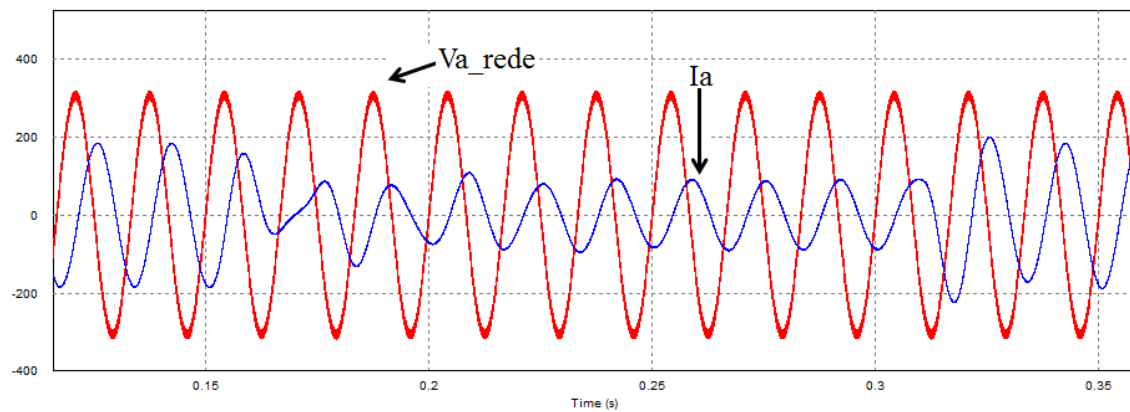


Figura 89 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Por fim, para 12m/s → 6m/s → 12m/s tem as figuras 90, 91 e 92:

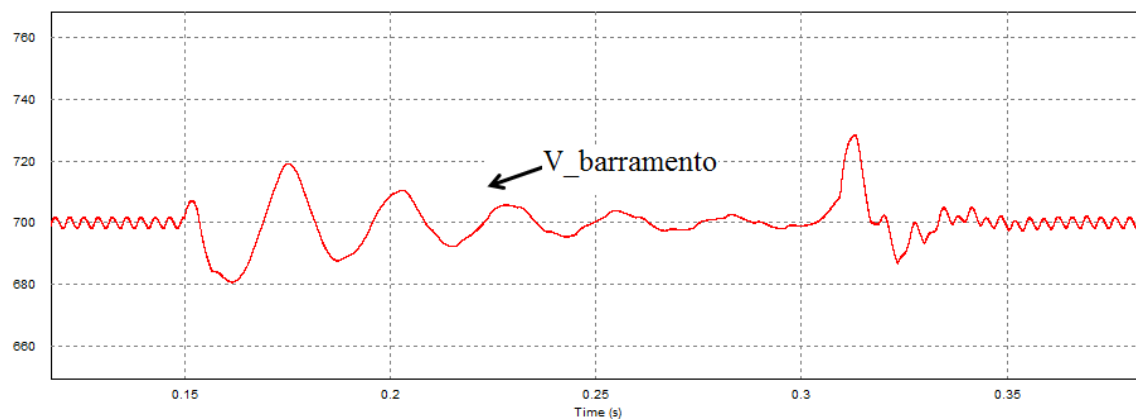


Figura 90 - Forma de onda da tensão de entrada do conversor boost.

Fonte: Autoria própria, 2014.

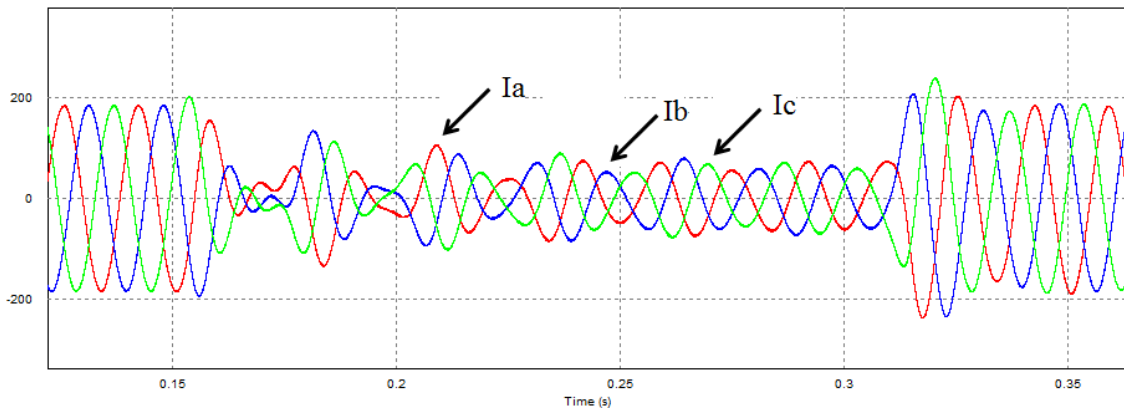


Figura 91 - Forma de onda das correntes de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

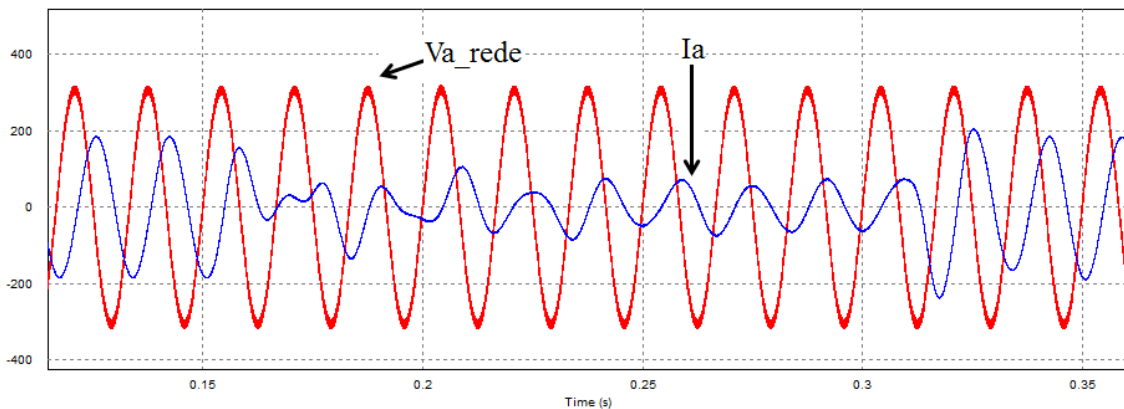


Figura 92 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Analisando o controle ótimo para as variações do vento, observa-se nas figuras 84, 87 e 90 o controle do barramento CC, porém ocorre um problema na correção do fator de potência quando se observa as formas de ondas para tensão e corrente da fase A para as respectivas figuras.

4.2.3 Afundamento da Rede Monofásica

A depender da falta em um sistema elétrico, o afundamento pode causar um decréscimo da tensão do sistema, e para isto o sistema tem o objetivo de reduzir a quantidade e a severidade dos eventos ou até mesmo imunizá-lo. A seguir serão apresentadas as respostas para os controladores PI, PI + LQR e LQR diante de um afundamento monofásico de 20% e 50% do valor de pico (311V), considerando uma duração de 150ms em uma velocidade constante de 12m/s.

4.2.3.1 Controlador PI

Durante um afundamento de tensão em 20% do valor de pico (248.8V), foram apresentadas as seguintes formas de onda de tensão e corrente, segundo as figuras 93, 94 e 95. Nesta situação o sistema se restabelece em aproximadamente 50ms e mantém a tensão do barramento CC controlada.

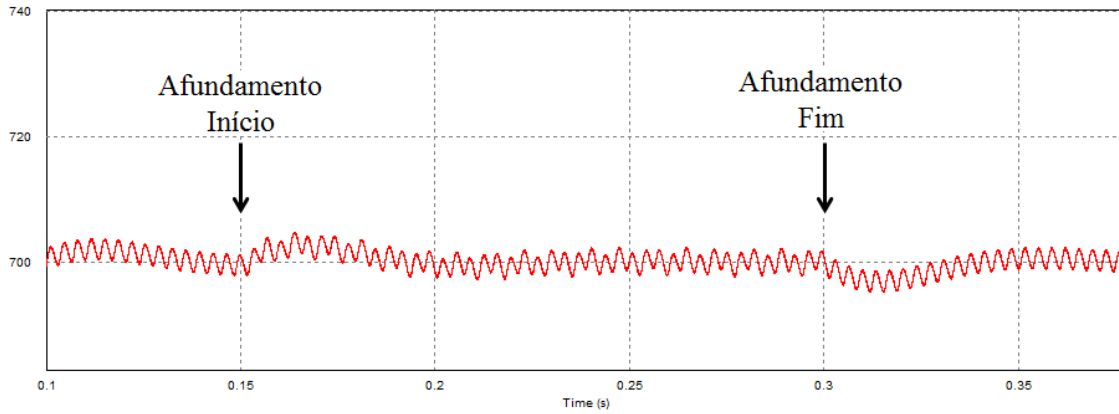


Figura 93 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

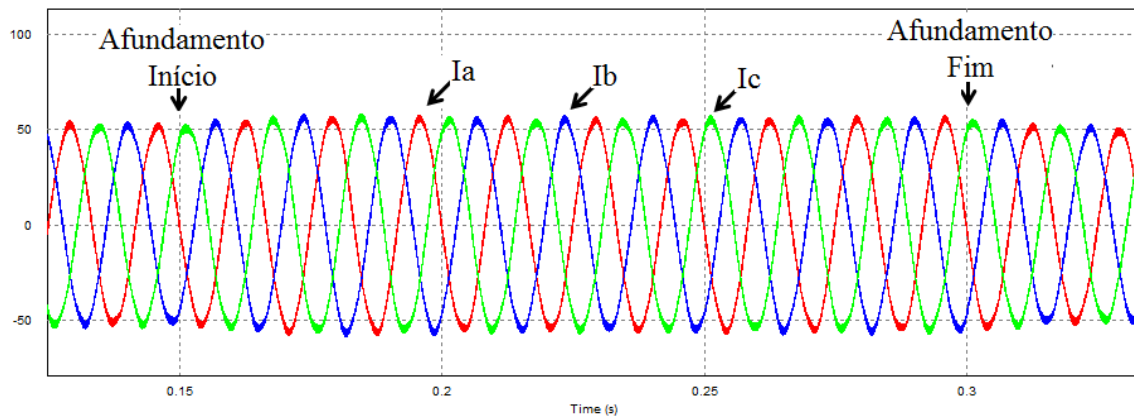


Figura 94 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

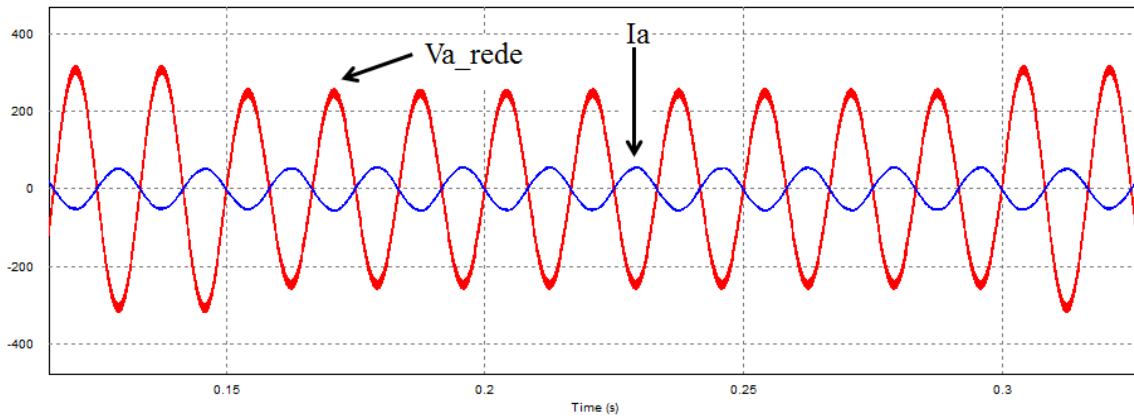


Figura 95 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Com um afundamento de 50% do valor de pico (155.5V), a tensão no barramento CC consegue manter em um valor médio de 700V, porém com um *overshoot* maior em relação ao afundamento de 20% e um restabelecimento de aproximadamente 50ms. As figuras 96, 97 e 98 demonstram os resultados.

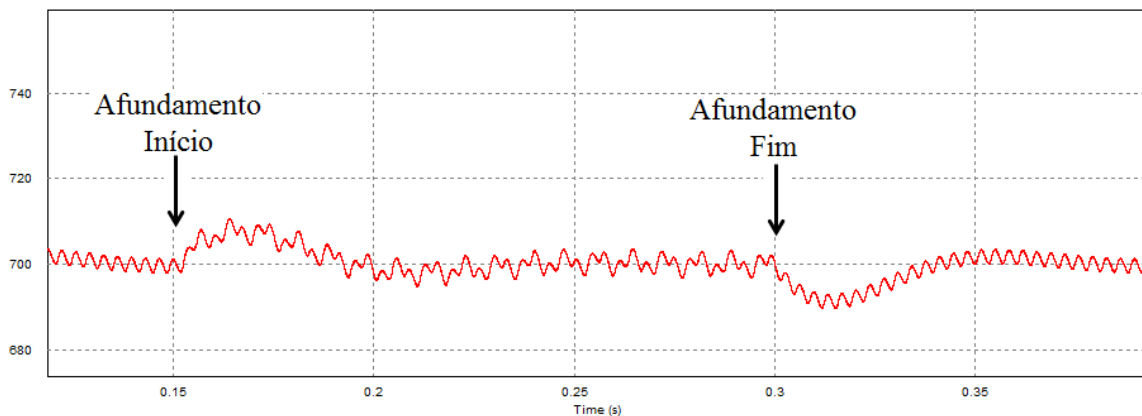


Figura 96 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

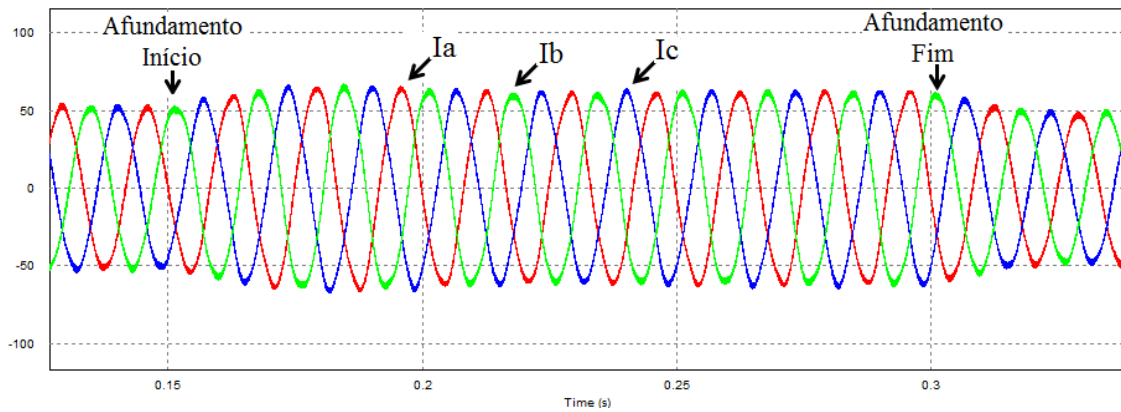


Figura 97 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

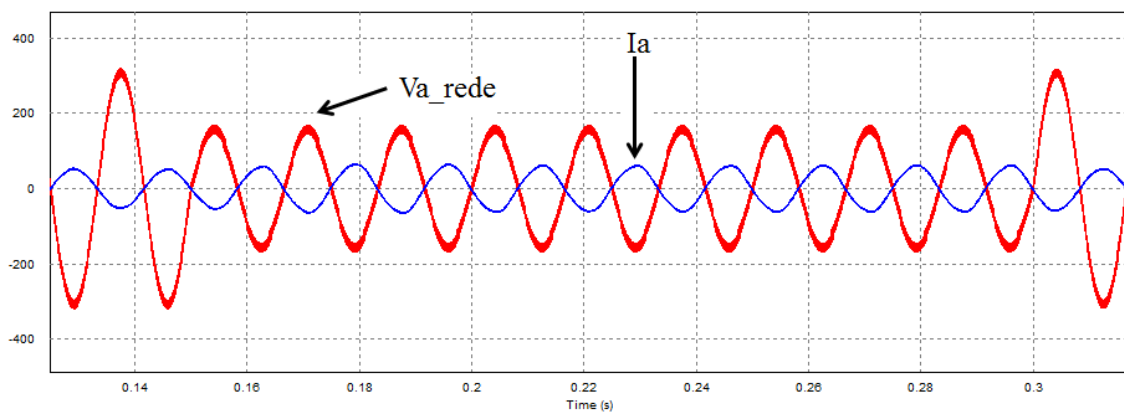


Figura 98 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

4.2.3.2 Controlador Híbrido (PI + LQR)

Utilizando um sistema de controle híbrido para o inversor e um afundamento de tensão em 20% do valor de pico (248,8V), foram apresentadas as seguintes formas de onda de tensão e corrente, segundo as figuras 99, 100 e 101. Nesta situação, o sistema se restabelece em aproximadamente 20ms e mantém a tensão do barramento CC controlada.

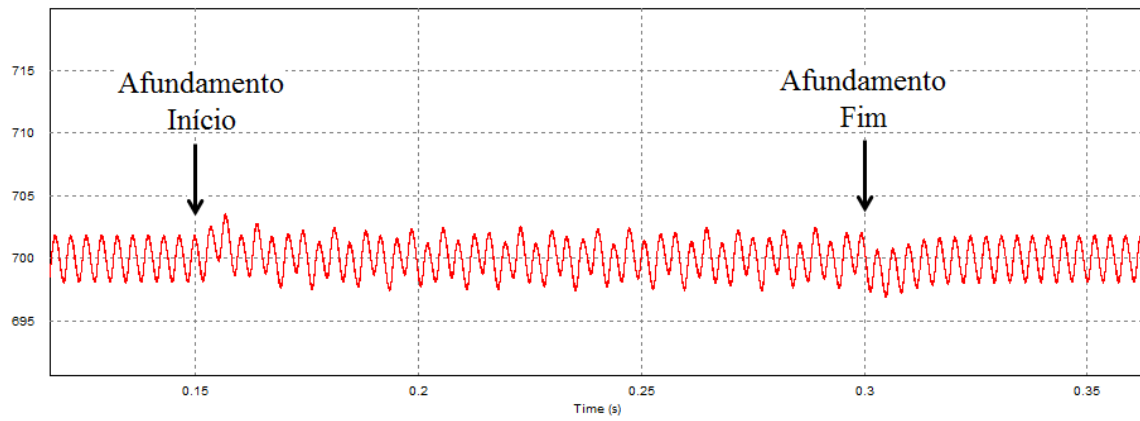


Figura 99 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

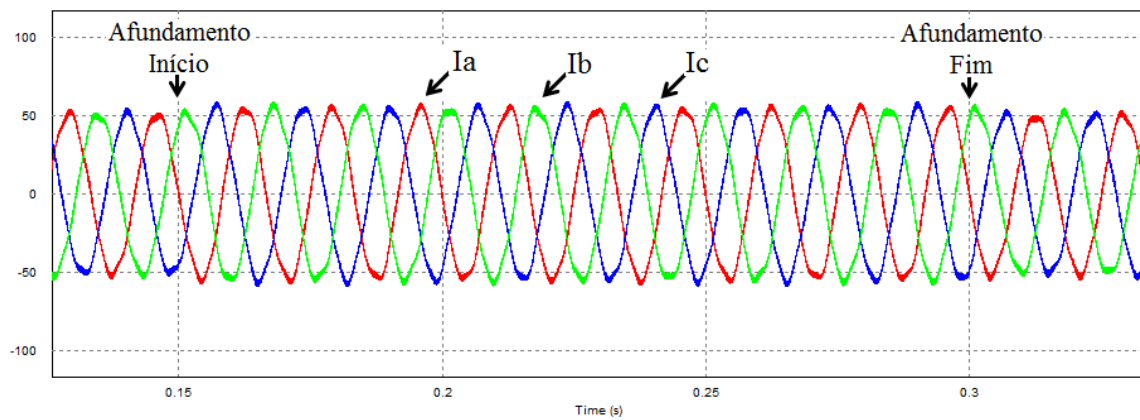


Figura 99 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

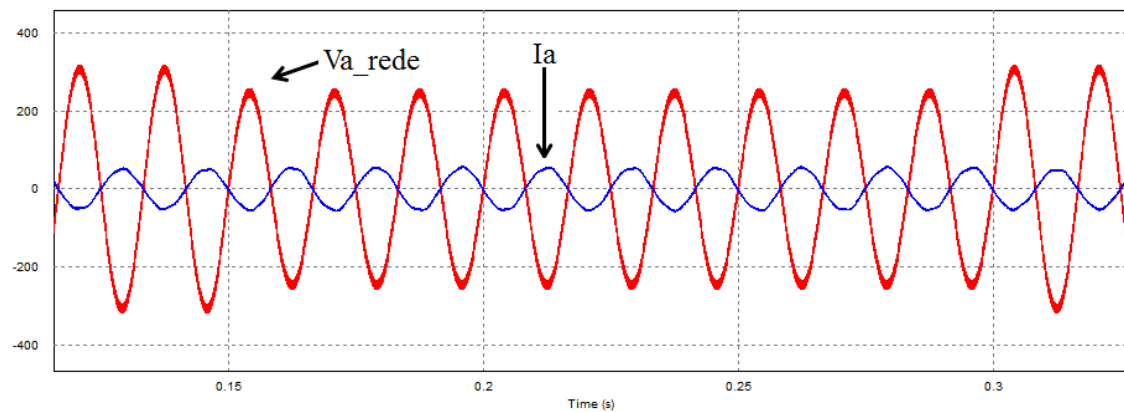


Figura 100 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Com um afundamento de 50% do valor de pico (155.5V), a tensão no barramento CC consegue manter em um valor médio de 700V, e um reestabelecimento de aproximadamente 20ms. As figuras 102, 103 e 104 demonstram os resultados.

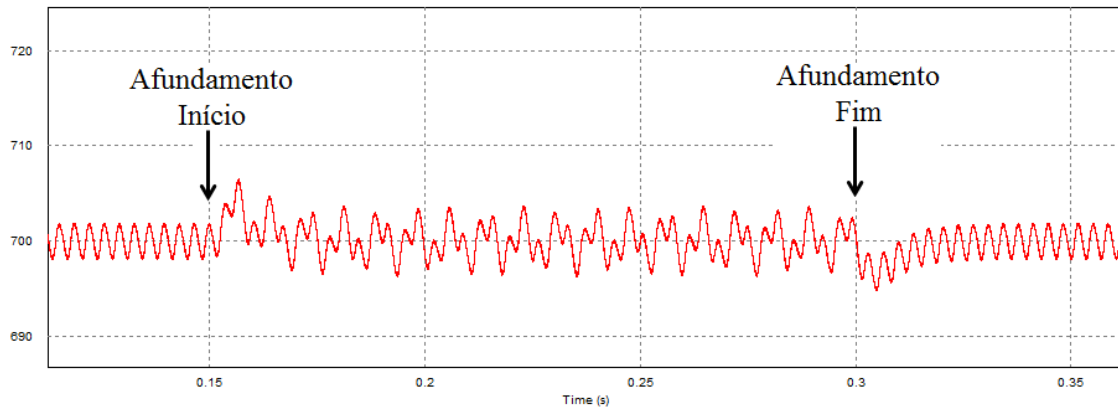


Figura 101 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

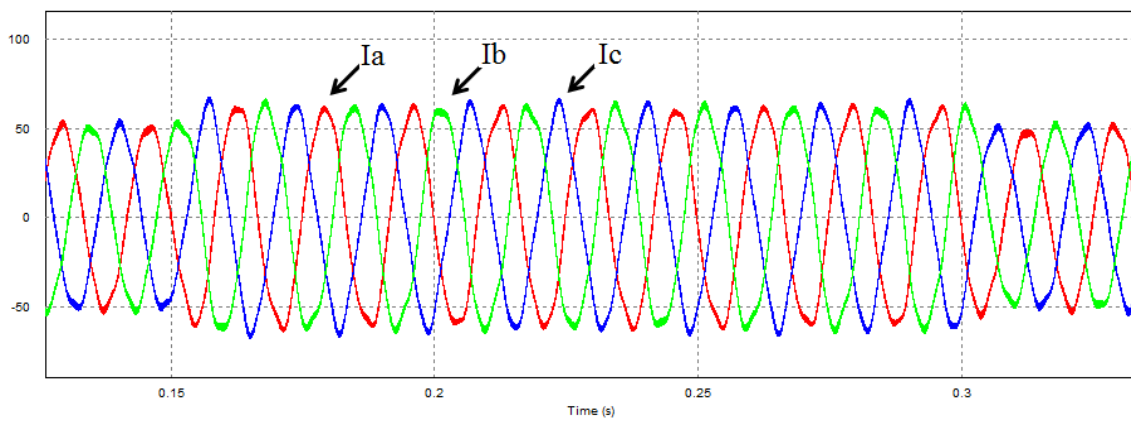


Figura 102 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

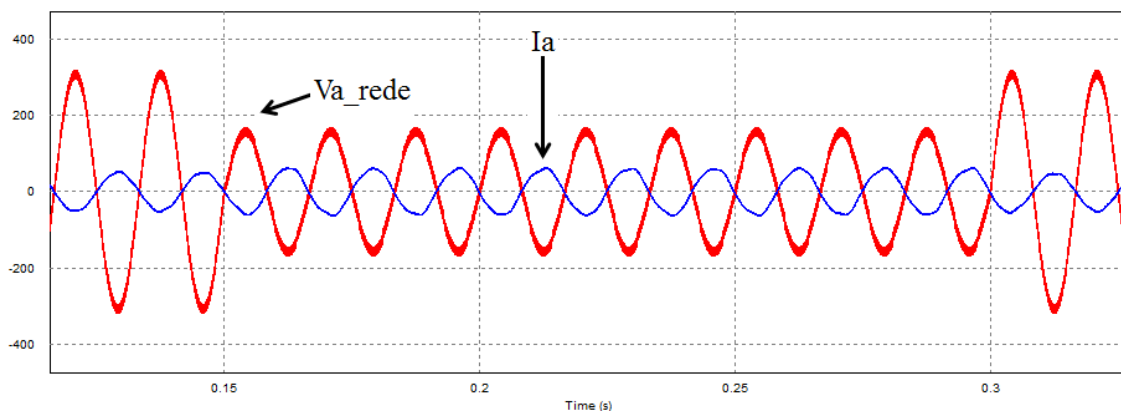


Figura 103 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

O controle do barramento CC com sistema híbrido apresentou seus resultados nas figuras 99 e 102 que mantêm um restabelecimento mais rápido quando comparado com o controle PI, com isso um *overshoot* também menor.

4.2.4 Afundamento da Rede Trifásica

A partir do afundamento monofásico, também foi gerado um afundamento trifásico utilizando um afundamento de 20% e 50% do valor de pico da tensão da rede elétrica (311V), durante 150ms.

4.2.4.1 Controlador PI

Nas simulações com o controle PI, o afundamento trifásico teve os seguintes desempenhos para 20%, como apresentam as figuras 105, 106 e 107. Ainda que sofra esta queda o sistema consegue manter o controle do barramento CC, e com um restabelecimento de aproximadamente 110ms.

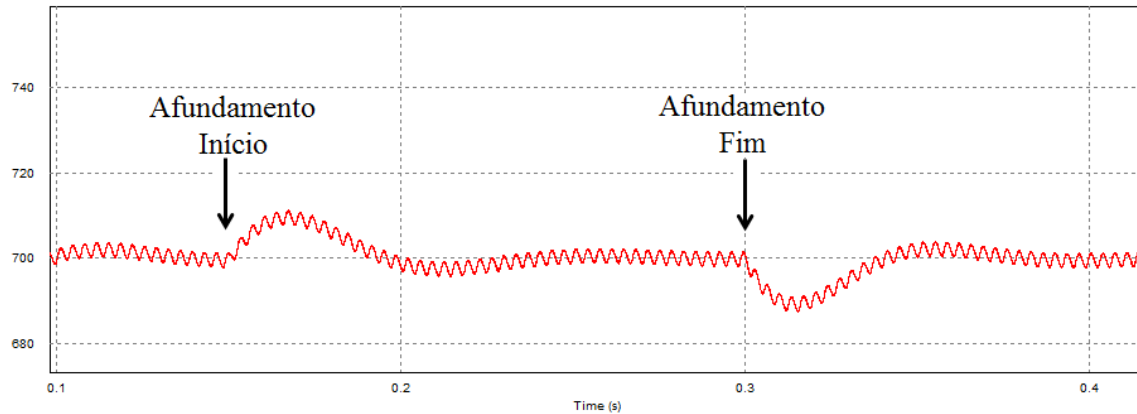


Figura 104 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

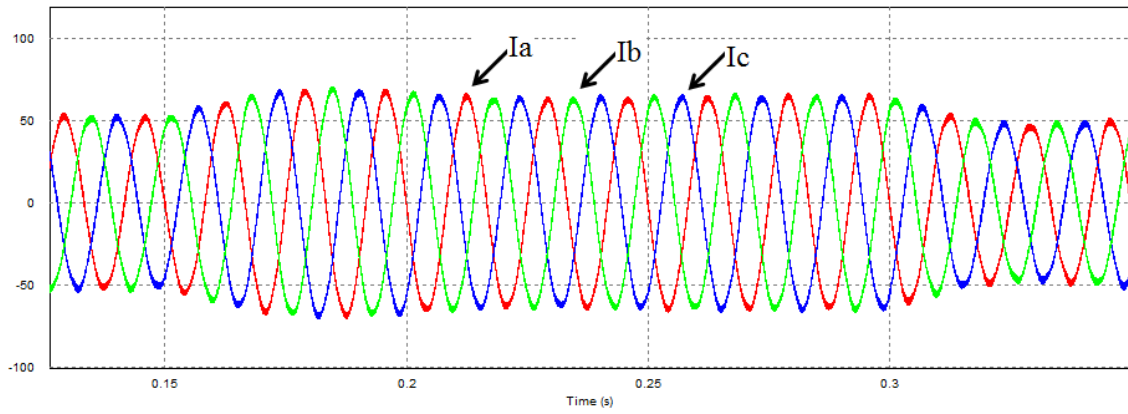


Figura 105 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

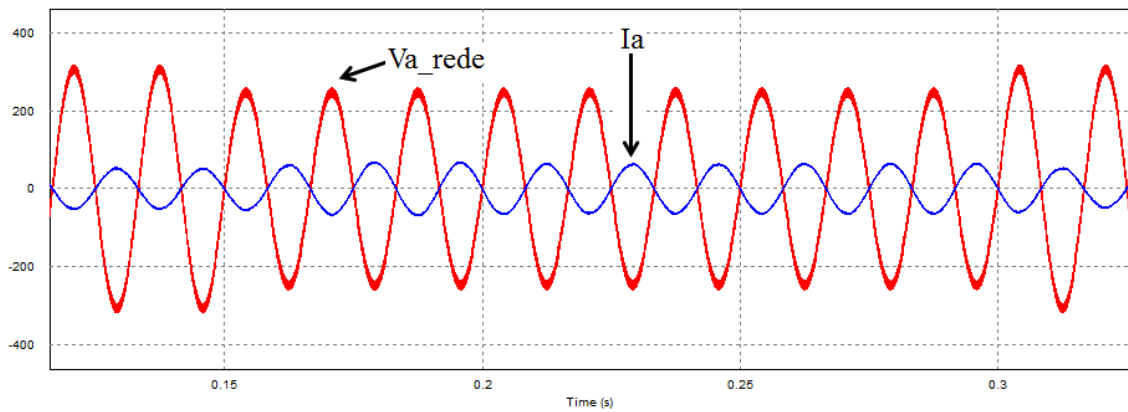


Figura 106 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Com uma queda de 50%, o sistema continua a manter o controle no barramento CC, porém com um restabelecimento de aproximadamente 150ms como são apresentados os gráficos nas figuras 108, 109 e 110.

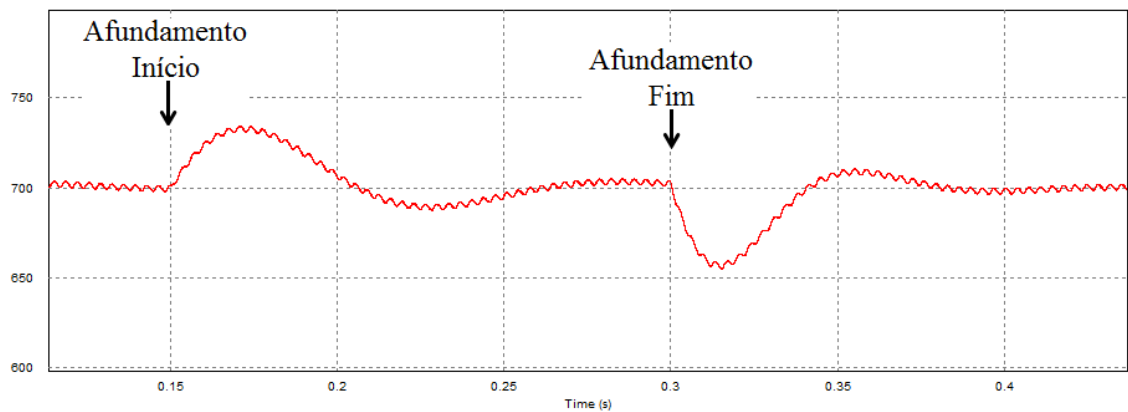


Figura 107 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

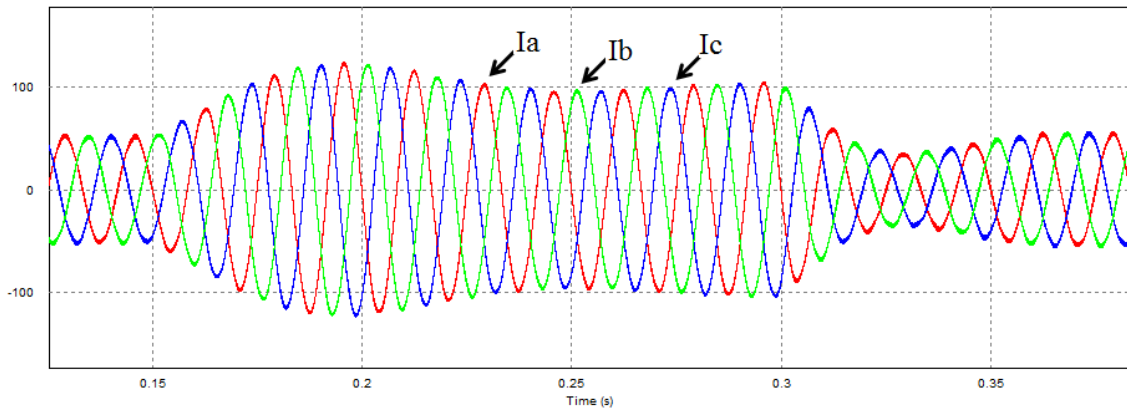


Figura 108 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

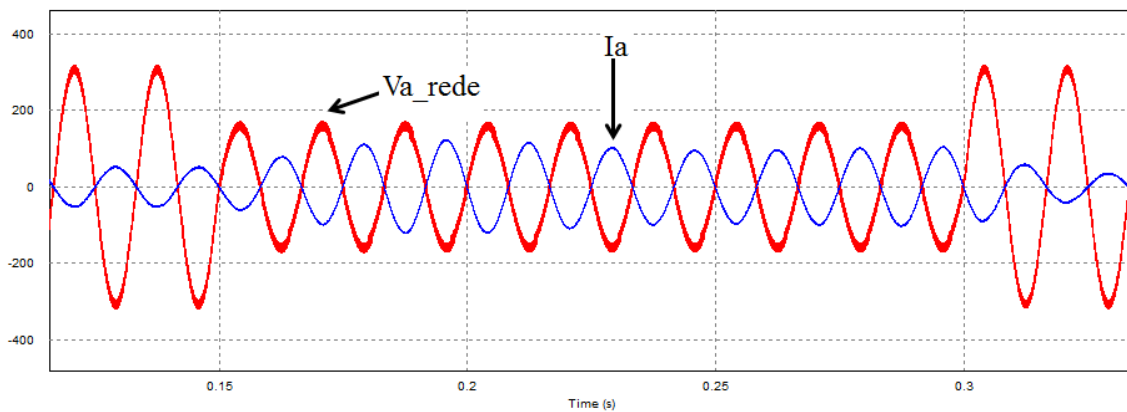


Figura 109 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

4.2.4.2 Controlador Híbrido (PI + LQR)

Agora com o controle PI + LQR, o afundamento trifásico teve os seguintes desempenhos para 20%, como apresentam as figuras 111, 112 e 113. Ainda que sofra esta queda o sistema consegue manter o controle do barramento, e com um reestabelecimento de aproximadamente 100ms.

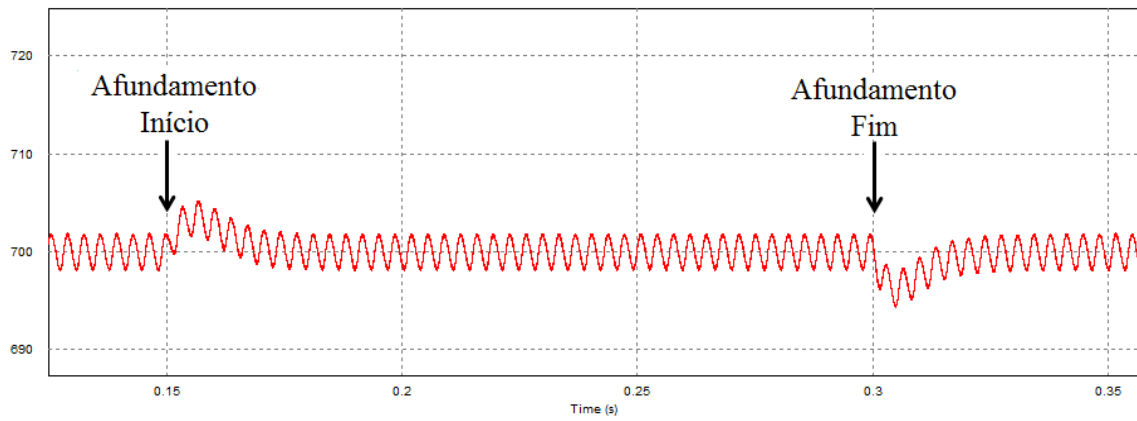


Figura 110 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

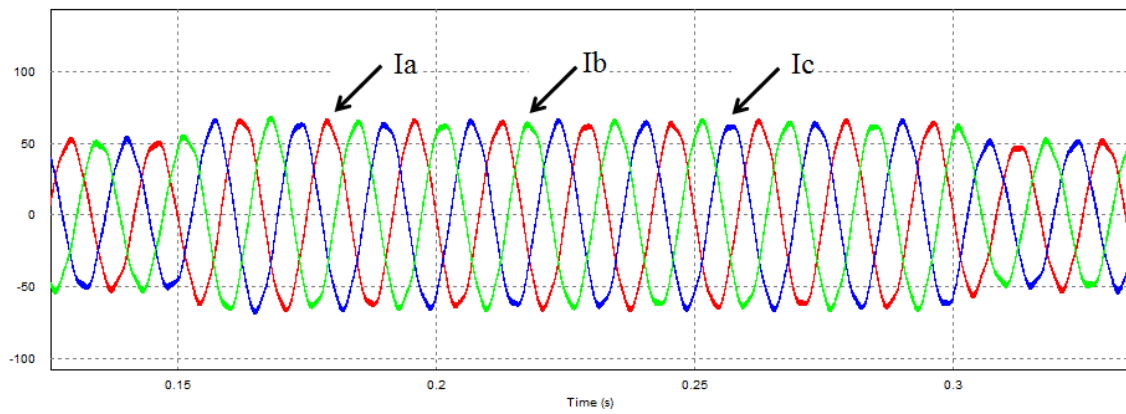


Figura 111 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

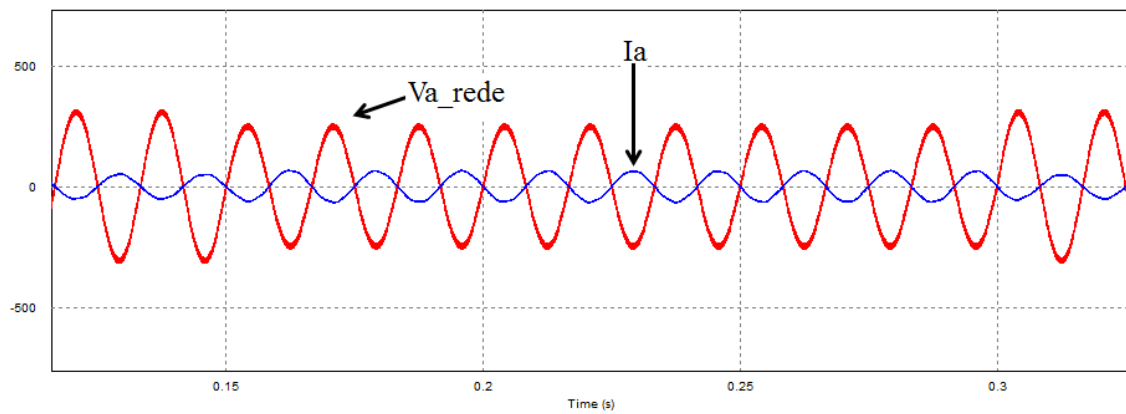


Figura 112 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Com uma queda de 50%, o sistema continua a manter o controle no barramento CC, porém com um restabelecimento de aproximadamente 150ms como são apresentados os gráficos nas figuras 114, 115 e 116.

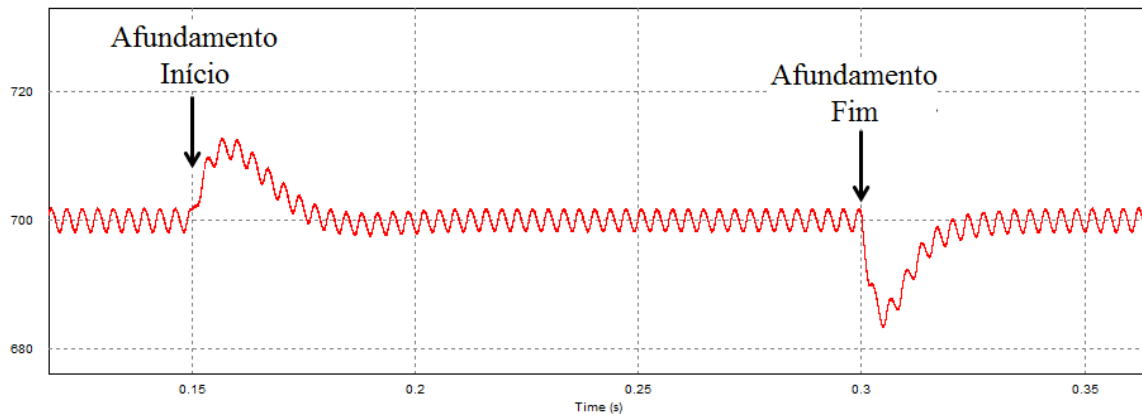


Figura 113 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

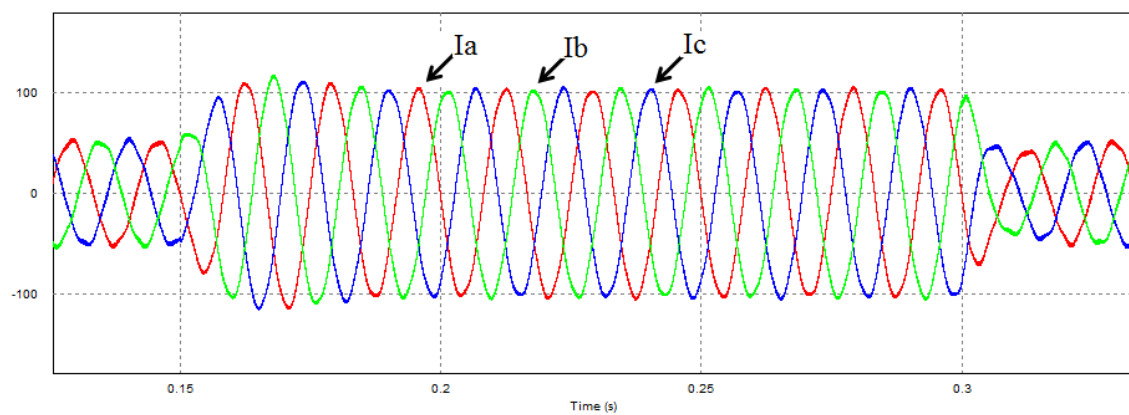


Figura 114 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

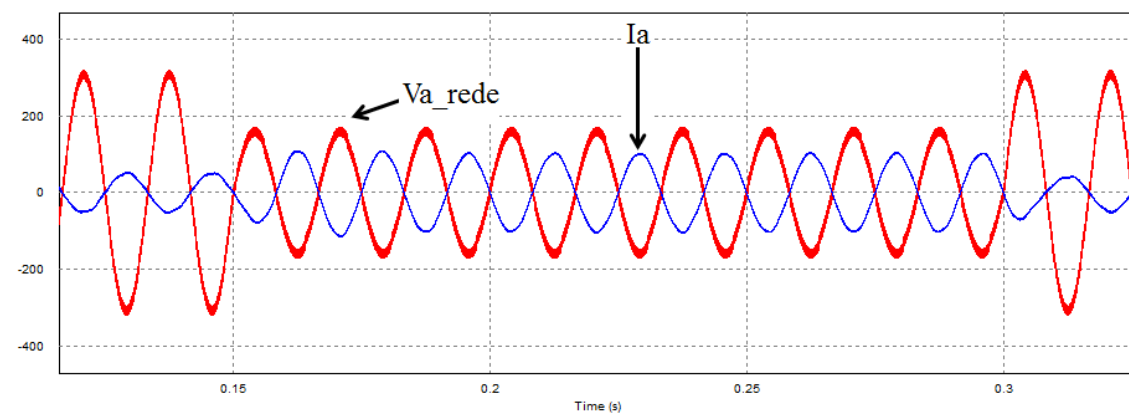


Figura 115 - Forma de onda da tensão e corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

Nesta simulação o controle do barramento CC com sistema híbrido apresentou seus resultados nas figuras 111 e 114, um *overshoot* menor quando comparado com o controle PI.

4.2.5 Desbalanceamento da Rede Trifásica

Uma última forma de avaliar o comportamento dos controladores é através do desbalanceamento da rede elétrica no ponto de acoplamento comum (PAC), o fenômeno também é conhecido como desequilíbrio de tensão pelo módulo 8 da PRODIST, que é elaborado pela ANEEL.

Nesta situação, ocorrerá um desbalanceamento durante 150ms com o vento constante em 12m/s, uma queda de tensão do valor de pico (311V) de 20% na fase A (248.8V), 50% na fase B (155.5V) e mantendo o valor de pico na fase C (311V). Para demonstrar os resultados, será analisado o nível de tensão no barramento CC, correntes e tensão da rede.

4.2.5.1 Controlador PI

Durante o desbalanceamento de 150ms, o controlador consegue restabelecer o sistema em aproximadamente 150ms, como é apresentado nas figuras 117, 118 e 119.

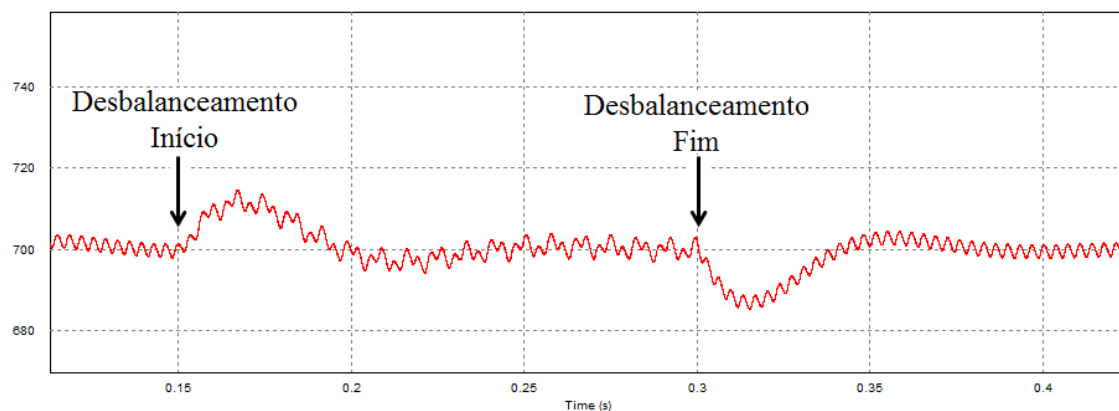


Figura 116 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

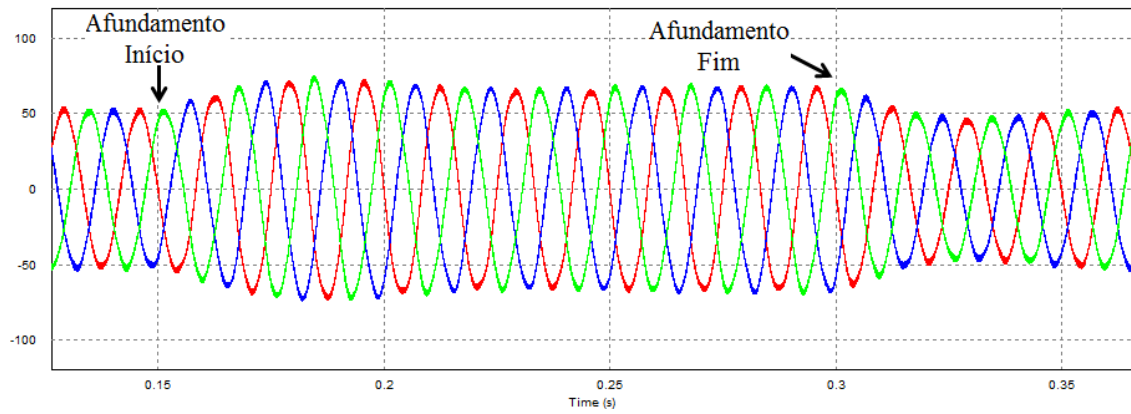


Figura 117 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

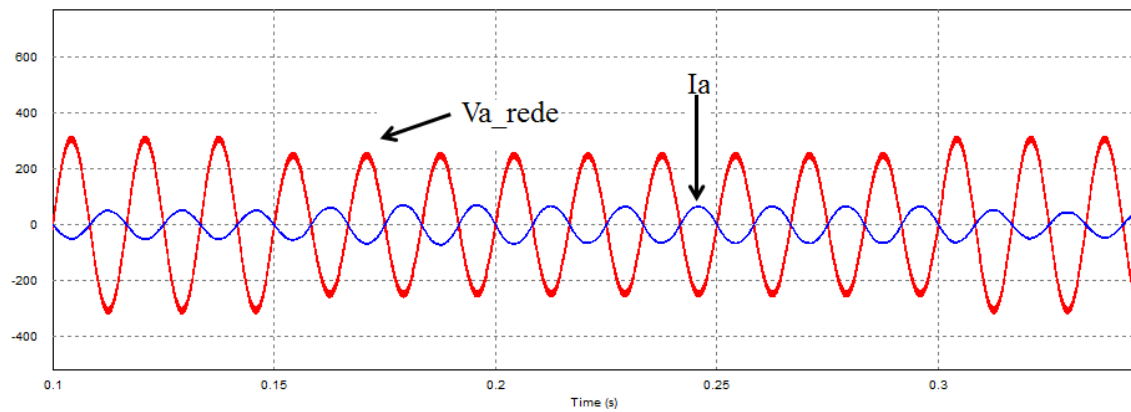


Figura 118 - Forma de onda da tensão e corrente.

Fonte: Autoria própria, 2014.

4.2.5.2 Controlador Híbrido (PI + LQR)

Nesta situação, o sistema híbrido consegue se restabelecer em aproximadamente 30ms e com uma redução do *overshoot* em aproximadamente de 50% em relação ao PI conforme as figuras 120, 121 e 122.

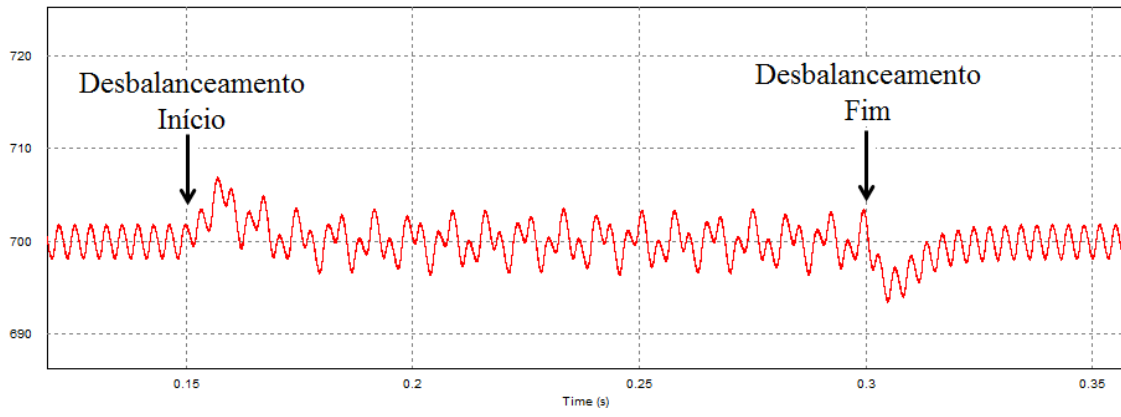


Figura 119 - Forma de onda da tensão no barramento CC.

Fonte: Autoria própria, 2014.

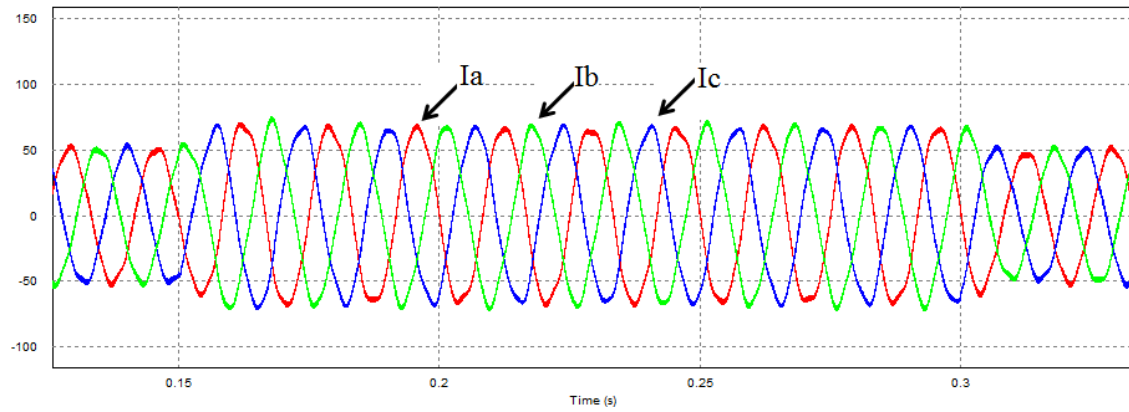


Figura 120 - Forma de onda da corrente de saída.

Fonte: Autoria própria, 2014.

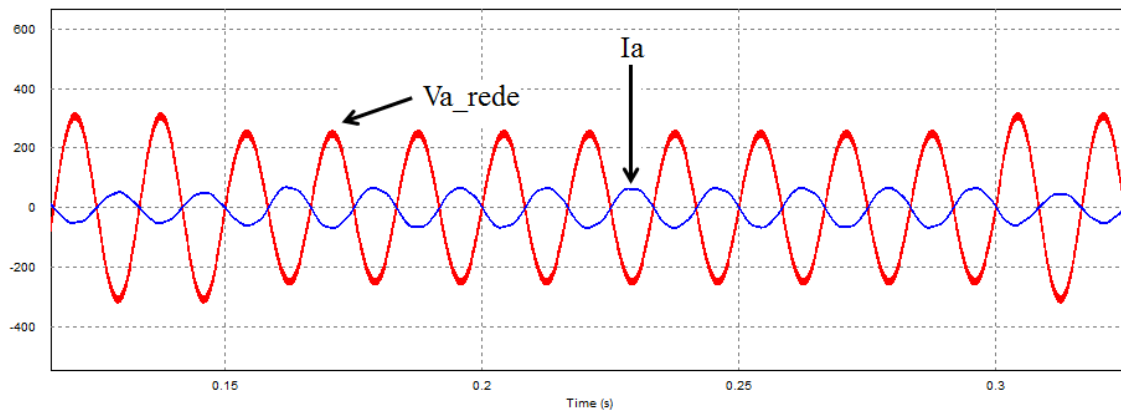


Figura 121 - Forma de onda da tensão e corrente.

Fonte: Autoria própria, 2014.

4.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou todos os resultados de simulação das estratégias de controle propostas pelo respectivo trabalho. O sistema eólico e o conversor do lado da rede foram simulados para regime permanente e regime transitório.

O controle ótimo se comportou de forma satisfatória para o controle do barramento e no tempo de restabelecimento, até mesmo conseguindo um valor de potência de saída próximo ao real, ou seja, o gerador tem uma potência de 25kW, enquanto se conseguiu uma potência de saída em 24kW e um rendimento de 96%.

Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros

A geração de energia elétrica através das fontes alternativas tem se tornado uma forma de contribuir na distribuição de energia com o crescimento do consumo do Brasil e no mundo, como também favorecer na diminuição da poluição na emissão de CO₂.

Aliado as fontes alternativas na geração de energia, a conexão de sistemas eólicos com a rede elétrica vem acompanhada de desafios, como manter a qualidade da energia injetada no sistema elétrico de transmissão. Para isso é necessário que as tecnologias sejam melhoradas e eficientes.

Com base neste panorama de desafios, neste trabalho foi apresentado um sistema eólico conectado à rede elétrica, de maneira a trabalhar com técnicas de controle no conversor no lado da rede elétrica, utilizando controlado PI, híbrido (PI + LQR) e LQR. O sistema eólico foi montado com o auxílio do *software* PSIM[®] do fabricante *Powersim* Inc. versão 9.1.

Para o controle do lado da rede, foram propostas a utilização de uma estratégia de controle híbrido (PI + LQR) e uma de controle ótimo (LQR), capazes de manter o controle no barramento CC e controlar a injeção de potência ativa e reativa para a rede elétrica.

Baseado nos resultados e observações feitas ao longo do Capítulo de Resultados pode-se afirmar que as estratégias mostraram-se relevantes e funcionais para aplicação, melhorando no tempo de restabelecimento diante de problemas de qualidade da energia, como também na correção do fator de potência.

Diante do que foi apresentado neste trabalho, verificou-se certa limitação em trabalhos a respeito de controladores ótimos (LQR) para a conexão de sistemas eólicos. Diante disso, observou-se uma grande viabilidade da utilização e da contribuição deste trabalho ao respectivo tema.

Como sugestões para trabalhos futuros citam-se os seguintes itens:

- Aprofundamentos das técnicas de controle ótimo em sistema de geração eólica;
- Avaliação de modelos de máquinas elétricas para o sistema eólico utilizando o controle ótimo;

-
- Utilização de uma técnica de PWM vetorial para o conversor do lado da rede;
 - Avaliação de outras ferramentas computacionais para a simulação do sistema com o controle ótimo;
 - Implementação de técnicas de sincronização com a rede elétrica que não afetem na qualidade da energia gerada;
 - Implementação prática do sistema eólico trabalhado.

Referências Bibliográficas

- ABEEólica. Associação Brasileira de Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>>. Acesso em: 15 de Junho de 2014.
- AHMED 2013, A. A.; ABDEL, L. K. M.; EISSA, M. M.; WASFY S. M., MALIK, O. **P. Study of Characteristics of Wind Turbine PMSG With Reduced Switches Count Converters**. Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2013. 26th Annual IEEE Canadian Conference on. : . 2013. p. 1-5.
- AHMED 2000, A.; **Eletrônica de Potência**. Tradução de Bazán Tecnologia e linguística, Eduardo Vernes Martino. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.
- BATSCHAUER, A. L. "Apostila da Disciplina de Controle de Conversores Estáticos", Apostila, Joinville, 2012. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/batschauer/materiais/Apostila_CCE_v7_simobiologia_.pdf> .Acesso em de 25 de Junho 2014.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA, J. M. G. **Sistemas de Controle: Princípios e Métodos de Projeto**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- BERNARDES, T. A. "Análise e Controle de Gerador Síncrono a Imã Permanente Aplicado a Sistema de Conversão de Energia Eólica", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Junho de 2009.
- BEZERRA, P. A. M. "Análise Teórica e Simulações de Um Aerogerador Síncrono de Velocidade Variável Utilizando Controle Vetorial", Monografia, Universidade Federal de Fortaleza, 2010.
- CARVALHO, A. J. S. "Modelo Matemático de um Sistema de Geração Eólico Baseado na Máquina Síncrona de Velocidade Variável", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho de 2010.
- CARVALHO, P. "Geração Eólica", Editora Imprensa Universitária da UFC, Fortaleza 2003.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN M. F.; SANTOSO S.; BEATY H. W. "Power Systems Quality", Second Edition 2004, McGraw-Hill.
- DUTRA, R. M. "Energia Eólica, Princípios e Tecnologias", Tutorial, Maio de 2008.

- EPE, 2014. Empresa de pesquisa energética. Balanço Energético Nacional. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf>. Acesso em 15 Junho de 2014.
- FERREIRA, S. L. A. “Análise da Operação de Sistemas Elétricos com Centrais Eólicas Durante Curto-Circuitos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Setembro de 2007.
- FREITAS, T. R. S; MENEGÁZ, P. J. M; SIMONETTI D. S. L. “Converter Topologies For Permanent Magnetic Synchronous Generator On Wind Energy Conversion System”, Power Electronics Conference (COBEP). IEEE 2011,p. 936-942
- GUO, X. Q.; WU, W. Y.; GU, H. R. **Phase Locked loop and Synchronization Methods for Grid-Interfaced Converters: A Review**. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2011. p. ISSN 0033-2097.
- GWEC. Global Wind Energy Council. Disponível em: <<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>>. Acesso em: 15 Junho de 2014
- KUCHENBECKER, W. E. “Proposta de Métodos para Ensaio em Máquinas Síncronas a Ímãs Permanentes Destinadas à Geração Eólica”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do ABC, Janeiro de 2013.
- LEITE, K. S.; COSTA, M. V. S.; CAMPOS, J. C. T. **Aplicação e Análise de Controle LQR com Ação Integral Robusta Multivariável Otimizado Via Desigualdades Matriciais Lineares**. DINCON 2011. 10ª Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações. Brasil. p. 120-123.
- LOPES, L. C. G. “Sistema Experimental Fotovoltaico de Geração de Energia Elétrica Operando em Paralelo com a rede Elétrica CA”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.
- MATOS, F. F. “Uma Discussão sobre Suportabilidade Frente a Afundamentos de Tensão de Sistemas Eólicos com Gerador Síncrono a Ímãs Permanentes”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Setembro de 2012.
- MAHERSI, E.; KHEDHER A.; MOMOUNI, M. F. **The Wind Energy Conversion System Using PMSG Controlled by Vector control and SMC Strategies**. International Journal of Renewable Energy Research, 2013.
- MENDES, F. V. “Ride-Through Fault Capability Improvement Through Novel Control Strategies Applied for Doubly-Fed Induction Wind Generators”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Maio de 2013.

- MOUSSA, M. F.; DESSOUKY Y. G.; WILLIAMS B. W. **Control Strategy of a 6MVA Connected Synchronous Generator for Wind Power**. Renewable Power Generation (RPG 2011). IET Conference on: IEEE. 2011. p. 1 - 6.
- MUNDACKAL, et al. Grid Power Quality Improvement and Battery Energy Storage in Wind Energy Systems. International Conference on Microelectronics, Communication and Renewable Energy (ICMiCR) 2013.
- NASCIMENTO, A. C, "Avaliação de Estratégias de Controle de Potência Reativa de Aerogeradores Síncronos em Redes Elétricas", Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, 2009.
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Tradução de Heloísa Coimbra de Souza. 5a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- OLESKOVICZ, M. "Qualidade da Energia Elétrica", Apostila, São Carlos, 2007.
- ONS, 2010. Operador nacional do sistema. Submódulo 3.6: Requisitos Técnicos Mínimos para Conexão às Instalações de Transmissão,
- ONS, 2011. Operador nacional do sistema. Submódulo 2.8: Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e dos Barramentos dos Transformadores de Fronteira, e de Seus Componentes.
- PATI, S.; BEHERA, S. S.; PATTANAIK T. K. **A Vector Control Strategy Of Grid Side Converter For Decoupled Control Of Active And reactive Power**. International Conference on Innovations in Engineering and Technology (ICIET'14), 2014.
- PAVINATTO, E. F. "Ferramenta para Auxílio à Análise de Viabilidade Técnica da Conexão de Parques Eólicos à rede Elétrica", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Abril de 2005.
- POMILLO, A. **Eletrônica de Potência**, Módulo 5. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/ee833/Modulo5.pdf>>. Acesso em 25 de junho de 2014.
- PINTO, V. P. "Modelagem e Simulação de Uma Planta Eólica Controlada por um Regulador Linear Quadrático Conectada ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Março de 2007.
- PINTO, M. O. **Fundamentos de Energia Eólica**. 1. ed. Porto Alegre: Editora LTC, 2013.

- REN, W.; QIAN, L.; CARTES, D.; STEURER, M. **A Multivariable Control Method in STATCOM Application for Performance Improvement**. Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005: IEEE, 2005. p. 2246-2250.
- RAJENDRAN, M.; GOVINDARAJAN U.; SANKAR D. S. P. **Active and Reactive Power Regulation in grid Connected Wind Energy Systems With Permanent Magnet Synchronous Generator and Matrix Converter**. IET Power Electronics, 2013.: IEEE. 2013. p. 591-603.
- RAMOS, M. C. L. "Análise do Comportamento de Aerogeradores Frente a Afundamentos Momentâneos de Tensão", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Abril de 2009.
- SANTOS 2005, F. M. C. S. "Modelagem e Avaliação de Estabilidade Transitória de Aerogeradores Síncronos com Magneto Permanente em Sistemas de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Abril de 2005.
- SANTOS 2011, R. J. M.; SERRA, G. L. O. Proposta de Metodologia Para Projeto de Controle LQR Nebuloso com Alocação de Pólos. **X SBAI: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, São João Del-Rei, v. X, Set 2011. ISSN 2175-8905.
- SCHWANZ, D.; HENKE, R. E.; LEBORGNE, R. C. "Wind Power Integration in Southern Brazil: Steady-State Analysis", Sixth Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D), 2012.
- SONG, S.H.; KANG, S.I.; HAHM, N. K. **Implementation and Control of grid Connected AC-DC-AC Power Converter for Variable Speed Wind Energy Conversion System**. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2003 International Conference: IEEE. 2003. p. 154-158.
- TIBOLA, G. "Sistema Eólico de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Março de 2009.
- TAKEI, M.; NAITO T.; UENO K. **The Reverse Blocking IGBT for Matrix Converter With Ultra-Thin Wafer Technology**. Power Semiconductor Devices and CIs, 2003. Proceeding: IEEE. 2003. 15th International Symposium on. p. 156-159.

- VOLTONI, H. V. “Modelagem e Controle de Geradores de Indução Duplamente Alimentados com Aplicação em Sistemas Elétricos”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Março de 2007.
- ZANCHETTIN, M. G. “Análise da Inserção de Geração Eólica com Aerogeradores de Indução”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Abril de 2012.