

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM
D-STATCOM PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO
MONOFÁSICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Taciana Paula Enderle

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**ANÁLISE, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM
D-STATCOM PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO
MONOFÁSICA**

por

Taciana Paula Enderle

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Prof. Cassiano Rech

Santa Maria, RS, Brasil

2012

Enderle, Taciana Paula

Análise, Projeto e Implementação de um D-STATCOM para Redes de Distribuição Monofásica/ por Taciana Paula Enderle. - Santa Maria, 2012

118 p.; 30cm

Orientador: Cassiano Rech, Dr.

Co-orientador:

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2012.

1. Engenharia elétrica 2. Eletrônica de potência 3. Conversores Estáticos I. Rech, Cassiano II. Título.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

© 2012

Todos os direitos autorais reservados a Taciana Paula Enderle. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Av. Francisco Manoel, 254, Santa Maria, RS, 97015-260

Fone: 55 3798 1262; Endereço Eletrônico: taciana.enderle@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM D-STATCOM
PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO MONOFÁSICA**

elaborada por
Taciana Paula Enderle

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Cassiano Rech, Dr.
(Presidente/Orientador)

Sérgio Luís Haffner, Dr. (UFRGS)

Vinícius Foletto Montagner, Dr. (UFSM)

Luciano Schuch, Dr. (UFSM)

(TROCA PELA ASSINADA)

Santa Maria, 31 de julho de 2012.

Dedico este trabalho
A meus pais, Paulo e Vera
e ao meu irmão Marcos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da Vida.

Ao meu Pai Paulo, minha Mãe Vera e meu Irmão Marcos, que não mediram esforços para que eu pudesse realizar os meus sonhos. Pelo carinho, apoio, incentivo e amor incondicional. Pela luta de cada dia para proporcionar os meus estudos.

As minhas amigas e amigos e aos meus familiares, pelo apoio e carinho.

Ao meu orientador, professor Cassiano Rech, pelos ensinamentos tanto profissionais como de vida. Por sua brilhante orientação nesse período que foi fundamental para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos demais professores do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC), Prof. José Renes Pinheiro, Prof. Humberto Pinheiro, Prof. Hilton Abílio Gründling, Prof. Luciano Schuch, Prof. Leandro Michels, Prof. Robinson Figueiredo de Camargo, Prof. Hélio Hey, Prof. Vinícius Foletto Montagner e Prof. Maria Beatriz de Moraes Carnielutti.

Aos colegas do GEPOC, Rafael Concatto Beltrame, Leandro Roggia, Hamiltom Sartori, Fernando Beltrame, Fabrício Dupont, Jorge Rodrigo Massing, Luccas Kunzler, Tadeu Vargas, Guilherme Sebastião da Silva, Rafael Zanatta Scapini, Celso Becker Tische, Rodrigo Padilha Vieira, Fernanda de Moraes Carnielutti, Josemar Oliveira, Matheus Iensen Desconzi pela amizade e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos alunos de iniciação científica, Karin Feistel, Clécio Fischer, Fabrício Cazakevicius, Rodrigo Krug, Henrique Figueira, Henrique Marques, Leonardo Bertagnoli, Sabrina Marinho, que também contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, nas atividades teóricas e de bancada.

Aos funcionários do Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica (NUPEDEE), pelas contribuições no desenvolvimento dos protótipos utilizados nos resultados experimentais. Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), pelo trabalho desenvolvido na secretaria, fundamental ao bom andamento das atividades deste programa.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho, e também, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer!”(Mahatma Gandhi)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

ANÁLISE, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM D-STATCOM PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO MONOFÁSICA

AUTOR: TACIANA PAULA ENDERLE

ORIENTADOR: CASSIANO RECH

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 31 de julho de 2012.

Palavras-chave: Controle, Modelagem, Inversor Monofásico.

Neste trabalho é realizado um estudo acerca de um regulador de tensão aplicado a redes de distribuição monofásicas de baixa tensão, especialmente para longas linhas de distribuição rurais que apresentam problemas de adequação dos níveis de tensão. A topologia do regulador de tensão classifica-se como D-STATCOM (*Distribution Static Synchronous Compensator*), uma vez que é composto por um inversor PWM (*Pulse Width Modulation*) monofásico conectado em paralelo com o ponto de acoplamento comum através de um filtro *LC*, compondo um sistema de terceira ordem (*LCL*) com a indutância da rede. Um sistema de controle digital para o D-STATCOM é proposto nesta Dissertação, sendo composto por três malhas de tensão: a de amortecimento, a malha de controle da tensão CA, responsável pelo controle da tensão fornecida pelo regulador e a malha de controle da tensão CC, responsável pela regulação da tensão do barramento CC. Além disso, emprega-se uma retroação de estados a fim de realizar o amortecimento ativo do filtro *LCL*. Por fim, resultados experimentais são apresentados para demonstrar a eficiência do sistema de controle proposto.

ABSTRACT

Master Thesis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

ANALYSIS, DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A D-STATCOM FOR SINGLE-PHASE DISTRIBUTION NETWORKS

AUTHOR: TACIANA PAULA ENDERLE
RESEARCH SUPERVISOR: CASSIANO RECH
Santa Maria, July 31th, 2012.

Keywords: Control, Modeling, Single-phase Inverter.

This work analyzes a voltage regulator applied to low-voltage single-phase distribution networks, especially long distribution rural distribution lines with problems to comply with voltage level standards. This voltage regulator is classified as D-STATCOM (*Distribution Static Synchronous Compensator*), since it is composed of a single-phase PWM inverter connected in parallel with the point common coupling through a second-order LC filter, composing a third order circuit (LCL circuit) with the line inductance. A digital control system is proposed for the D-STATCOM in this dissertation, composed of three voltage loops: the damping, the control loop of the AC voltage, which controls the voltage supplied by the regulator control loop and the DC voltage control loop, responsible for regulating the DC bus voltage. Moreover, a full-state feedback controller is used to achieve active damping of the LCL filter resonance. Finally, experimental results are presented to demonstrate the efficiency of the proposed control system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Característica de tensão e corrente do STATCOM e do SVC	25
Figura 2 - DVR conectado à rede através do transformador de acoplamento	25
Figura 3 - D-STATCOM conectado á rede	26
Figura 4 - Circuito simplificado para análise da tensão no PAC.....	32
Figura 5 - Tensão no PAC <i>versus</i> potência na carga ($V_r = 1$ pu, $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu).....	32
Figura 6 - Tensão no PAC <i>versus</i> Impedância da linha ($V_r = 1$ pu, $S_o = 1$ pu, $FP_o = 1$)	33
Figura 7 - Diagrama do sistema sob análise	34
Figura 8 - Diagrama simplificado do sistema sob análise	34
Figura 9 - Variação do ângulo θ com a carga ($V_r = 1$ pu; $V_{PAC} = 1$ pu; $Z_r = 0,14+j0,14$ pu)....	41
Figura 10 - Variação da potência reativa Q_{inv} processada pelo inversor com a carga ($V_r = 1$ pu; $V_{PAC} = 1$ pu; $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu)	42
Figura 11 - Variação da potência reativa Q_{inv} processada pelo inversor com a carga, para diferentes tensões no PAC ($V_r = 1$ pu; $FP_o = 1$; $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu)	43
Figura 12 - Variação da potência reativa Q_{inv} processada pelo inversor com a tensão no PC, com potência nominal ($V_r = 1$ pu; $FP_o = 1$; $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu)	43
Figura 13 - Relação entre Q_{inv} e Z_r ($V_r = 1$ pu; $FP = 1$; $R_r = 0,14$)	44
Figura 14 - Diagrama simplificado do sistema sob estudo, incluindo o D-STATCOM operando em malha fechada	47
Figura 15 - Circuito equivalente para obter o modelo médio dinâmico do lado CA	49
Figura 16 - Modulação por largura de pulso unipolar	50
Figura 17 - Circuito equivalente composto pelo filtro passa-baixas e pela rede.....	52
Figura 18 - Validação do modelo do lado CA.....	54
Figura 19 - Comparação das respostas em frequências dos modelos do lado CA no tempo contínuo e no tempo discreto.....	56
Figura 20 - Fluxo de potência do sistema a vazio	56
Figura 21 - Transferência de potência ativa entre a rede e o inversor com a variação do ângulo θ	58
Figura 22 - Linearização de $\sin(\theta)$ para valores reduzidos de θ	59
Figura 23 - Validação do modelo do lado CC	61
Figura 24 - Comparação das respostas em frequências dos modelos do lado CC no tempo contínuo e no tempo discreto.....	62
Figura 25 - Sistema de controle digital proposto.....	62

Figura 26 - Modelo dinâmico do lado CA em espaço de estados	64
Figura 27 - Planta do lado CA com retroação total de estados para amortecimento ativo.....	64
Figura 28 - Localização dos polos e zeros do sistema em malha aberta	65
Figura 29 - Localização dos polos e zeros do sistema em malha fechada com retroação total de estados.....	67
Figura 30 - Respostas em frequência do sistema em malha aberta e do sistema amortecido ..	67
Figura 31 - Malha de controle da tensão do PAC	68
Figura 32 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta com a inclusão do compensador ressonante.....	69
Figura 33 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta do lado CA com a inclusão do compensador ressonante e da parcela de atraso de fase	70
Figura 34 - Resposta em frequência do controlador para sensibilidade de saída.....	70
Figura 35 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta do lado CA com a inclusão do compensador ressonante e da parcela de atraso de fase implementado	71
Figura 36 - Malha de controle da tensão do barramento CC.....	72
Figura 37 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta do lado CC com a inclusão do compensador PI e do filtro rejeita-faixa	73
Figura 38 - Geração do sinal de referência da tensão do PAC	73
Figura 39 - Sistema de sincronismo	74
Figura 40 - Sistema de controle incluindo uma perturbação da frequência da rede.....	76
Figura 41 - Representação da variação de frequência	77
Figura 42 - Tensão no PAC e tensão no PAC de referência durante um degrau de carga	78
Figura 43 - Detalhe da tensão no PAC no instante do degrau de carga	78
Figura 44 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga.....	79
Figura 45 - Ângulo θ gerado pela malha de controle da tensão do barramento CC.....	79
Figura 46 - Tensão no PAC e corrente do inversor durante um degrau de carga.....	80
Figura 47 - Tensão no PAC e corrente do inversor durante em regime	80
Figura 48 - Ângulo θ para uma variação de frequência	81
Figura 49 - Tensão do barramento CC e a tensão CC de referência para uma variação de frequência	81
Figura 50 - Tensão no PAC e a tensão no PAC de referência para uma variação de frequência	82
Figura 51 - Tensão no PAC e tensão de referência durante um degrau de carga, com variação da indutância da rede (30 mH)	83

Figura 52 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga, com variação da indutância da rede (30 mH)	83
Figura 53 - Tensão no PAC e tensão de referência durante um degrau de carga, com variação da indutância da rede (15 mH)	84
Figura 54 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga, com variação da indutância da rede (15 mH)	84
Figura 55 - Tensão no PAC e tensão de referência durante um degrau de carga, com variação da resistência da rede (1 Ω)	85
Figura 56 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga, com variação da resistência da rede (1 Ω)	85
Figura 57 - Tensão no PAC e tensão de referência durante um degrau de carga, com variação da resistência da rede (7 Ω)	86
Figura 58 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga, com variação da resistência da rede (7 Ω)	86
Figura 59 - Lugar das raízes dos polos em malha fechada com variação da indutância da rede ($L_r = 1 \text{ mH} \rightarrow 30 \text{ mH}$)	87
Figura 60 - Lugar das raízes dos polos em malha fechada com variação da resistência da rede ($R_r = 0,1 \Omega \rightarrow 10 \Omega$)	87
Figura 61 - Diagrama simplificado do sistema implementado em laboratório	89
Figura 62 - Resultado experimental sem D-STATCOM: Tensão no PAC durante degrau de carga de operação a vazio para carga resistiva nominal	91
Figura 63 - Resultado experimental sem D-STATCOM: Detalhe da tensão no PAC durante degrau de carga de operação a vazio para carga resistiva nominal	91
Figura 64 - Resultado experimental com D-STATCOM: Carga dos capacitores do barramento CC	93
Figura 65 - Resultado experimental com D-STATCOM: Corrente no inversor durante a partida	93
Figura 66 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no PAC e corrente no indutor de filtro para entrada de carga	94
Figura 67 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão do barramento CC para entrada de carga	95
Figura 68 - Resultado experimental com D-STATCOM: Ação de controle CA	95
Figura 69 - Resultado experimental com D-STATCOM: Ação de controle CC	96

Figura 70 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no ponto de acoplamento comum para retirada	96
Figura 71 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no PAC e corrente no indutor de filtro para retirada de carga	97
Figura 72 - Resultado experimental com D-STATCOM: Corrente no indutor de filtro para retirada de carga.....	97
Figura 73 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão do barramento CC para entrada de carga	98
Figura 74 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no PAC e corrente no indutor de filtro para variação de R_r	99
Figura 75 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão do barramento CC com variação de R_r	99
Figura 76 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no PAC e corrente no indutor de filtro para variação de L_r	100
Figura 77 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão do barramento CC com variação de L_r	100
Figura 78 - Foto da bancada de trabalho	110
Figura 79 - Foto da bancada de trabalho	110
Figura 80 - Placa de processamento central	111
Figura 81 - Representação da unidade inversora SKS25FB6U+(B2CI)2P10V12.....	113
Figura 82 - Algoritmo de sincronismo	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da tensão no ponto de entrega em tensão nominal até 1 kV	22
Tabela 2 - Valores base adotados	40
Tabela 3 - Parâmetros do sistema	53
Tabela 4 - Localização dos polos	66
Tabela 5 - Parâmetros do sistema implementado	89
Tabela 6 - Compensadores implementados	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
dB/dec	Decibéis/ década
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
D-STATCOM	<i>Distribution Static Synchronous Compensator</i>
DVR	<i>Dynamic Voltage Restore</i>
FP	Fator de potência
LQR	<i>Linear Quadratic Regulator</i>
N	Neutro
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PI	Proporcional-Integral
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
pu	Por unidade
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RTM	Regulador de tensão monofásico
RMS	<i>Roots Mean Square</i>
SMC	Sliding Mode Controllers
SSTS	<i>Solid-state Transfer Switch</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC	<i>Static VAr Compensator</i>
t	Tempo
TL	Tensão de Linha
TN	Tensão Nominal
TCR	<i>Thyristor Controlled Reactor</i>
TSC	<i>Thyristor Switched Capacitor</i>
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
UPQC	<i>Unified Power Quality Compensator</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Matriz dinâmica do sistema
B	Matriz de entradas do sistema
B_u	Matriz de entradas considerando o sinal de entrada $u(t)$
B_w	Matriz de entradas do sistema para distúrbio em v_r
C	Matriz de saídas do sistema
C_{CC}	Capacitor do barramento CC
CC	Corrente Contínua
C_N	Função de transferência do filtro <i>Notch</i>
C_{PI}	Função de transferência do controlador PI
C_R	Função de transferência do controlador ressonante
C₁	Contatora 1
C₂	Contatora 2
d	Razão cíclica
E{·}	Operador esperança
E	Erro de saída do sistema
E_C	Energia armazenada no banco de capacitores
<i>f_{corte}</i>	Frequência de corte
<i>f_s</i>	Frequência de chaveamento
G	Matriz dinâmica do sistema discreto
G_{CC}	Função de transferência do modelo CC
G_{CA}	Função de transferência do modelo CA
H	Matriz de entradas do sistema discreto
H_u	Matriz de entradas do sistema discreto considerando o sinal de entrada $u(k)$
H_w	Matriz de entradas do sistema discreto considerando o sinal de entrada $w(k)$
I_b	Corrente de base
<i>i_f</i>	Corrente do filtro
I_r	Corrente da rede
I_o	Corrente da carga
I_{pico}	Corrente de pico
<i>i_f</i>	Corrente do Filtro

i_r	Corrente da Rede
K	Matriz de ganhos de retroação
k_r	Ganho controlador ressonante
k_{pi}	Ganho do controlador PI
\mathbf{K}	Matriz de ganho retroação de estados
K_k	Ganho do filtro de Kalman no instante k
L_f	Indutor de filtro
L_r	Indutor da rede
N	Número de estados
$P_{k+1/k}$	Matriz de covariância do erro de estimação de x_{k+1} , obtida no instante k
P_d	Polos discretos
P_{inv}	Potência ativa do inversor
P_o	Potência ativa da carga
P_l	Potência ativa da linha
P_r	Potência ativa da rede
P_s	Polos contínuos
Q_i	Matriz de covariância do vetor de ruído de estado, no instante i
Q_{inv}	Potência reativa do inversor
Q_o	Potência reativa da carga
Q_l	Potência reativa da linha
Q_r	Potência reativa da rede
R_r	Resistência da rede
S_b	Potência de base
S_{inv}	Potência aparente do inversor
S_o	Potência aparente da carga
S_r	Potência aparente da rede
r	Referência
R_i	Matriz de covariância do vetor de ruído de medida, no instante i
R_r	Resistência da rede
R_p	Resistência de carga do barramento CC
R_o	Resistência da carga
t_k	Valor de tempo no instante k
T_s	Período de amostragem

v_{ab}	Tensão entre os ponto a e b do inversor
V_b	Tensão de base
V_{CC}	Tensão do barramento CC
V_M	Tensão pico-a-pico da portadora triangular
V_o	Tensão da carga
v_{PAC}	Tensão no ponto de acoplamento comum
V_r	Tensão da rede
V_l	Tensão da linha
v_{tri}	Amplitude da triangular do PWM
u_d	Atraso de implementação
u	Ação de controle
x	Vetor de estados do sistema
x_k	Vetor de estados, no instante k
x_{k+1}	Vetor de estados, no instante k + 1
$\hat{x}_{k+1 k}$	Estimativa predita do vetor de estados x_{k+1} , obtida no instante k
$\hat{x}_{k k-1}$	Estimativa predita do vetor de estados x_k , obtida no instante k – 1
X_r	Reatância da linha
X_o	Reatância da carga
y	Saída da planta
y_k	Vetor de medidas, no instante k
Z_b	Impedância de base
Z_r	Impedância da linha
Z_o	Impedância da carga
Z_r	Impedância da rede
ωt	Frequência da referência em ras/s
ω_n	Frequência polos do ressonante
ω_{n2}	Frequência zeros do ressonante
ω_{nn}	Frequência do filtro <i>notch</i>
Ω	Ohms
α	Ângulo da impedância da linha
ΔI_L	Varição de corrente no indutor de filtro
θ	Ângulo da tensão no PAC
ζ	Amortecimento Controlador Ressonante

Φ	Matriz de transição no instante k
Γ_k	Matriz de ganho do ruído de estado, no instante k
F_k	Matriz do modelo de medidas no instante k
γ_k	Vetor de ruído de estado, no instante k
v_k	Vetor de ruídos de estado, no instante k
δ_{ij}	Função Delta de Kronecker

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Organização da dissertação.....	30
CAPÍTULO 2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO.....	31
2.1 Problema de regulação de tensão.....	31
2.2 Estrutura do regulador de tensão.....	33
2.3 Análise em regime permanente senoidal do sistema de regulação de tensão	35
2.3.1 Cálculos das correntes	35
2.3.2 Cálculo da potência da rede de distribuição	36
2.3.3 Cálculo da potência da carga	37
2.3.4 Cálculo da potência na impedância da linha.....	38
2.3.5 Determinação do ângulo θ	39
2.3.6 Cálculo da potência reativa do inversor.....	39
2.3.7 Análise	40
2.4 Conclusões parciais.....	44
CAPÍTULO 3 SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO.....	46
3.1 Descrição do sistema de controle digital proposto	46
3.2 Modelagem dinâmica.....	48
3.2.1 Modelo do lado CA.....	49
3.2.2 Modelo da tensão do barramento CC.....	55
3.3 Projeto dos controladores.....	62
3.3.1 Malha de amortecimento ativo.....	63
3.3.2 Malha de controle da tensão do PAC.....	68
3.3.3 Malha de controle da tensão do barramento CC	71
3.3.4 Conexão entre as malhas de controle.....	73
3.4 Resultados de simulação.....	77
3.4.1 Análise com variação de frequência	80
3.4.2 Análise com variação dos parâmetros da rede.....	82
3.5 Conclusões parciais.....	87
CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	89
4.1 Resultados experimentais sem a conexão do D-STATCOM.....	90
4.2 Resultados experimentais com a conexão do D-STATCOM	92
4.2.1 Carga dos capacitores do barramento CC.....	92
4.2.2 Variações de carga.....	93
4.2.3 Variações paramétricas	98
4.3 Conclusões parciais.....	101

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	105
APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO	110
A.1 Placa Central de Processamento	111
A.2 Circuito de Partida	112
A.3 Inversor	113
A.4 Filtro <i>LC</i>	113
A.5 Tensão do barramento CC	114
A.6 Cargas e Rede	115
APÊNDICE B – ALGORITMO DE SINCRONISMO.....	116

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a demanda de energia elétrica no país cresce significativamente. Conseqüentemente, os investimentos das concessionárias deveriam crescer na mesma proporção para garantir um suprimento confiável e de qualidade para seus consumidores. Nesse sentido, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) atua constantemente na fiscalização dos níveis da qualidade da energia do setor energético brasileiro, e em casos de inconformidade, aplica as devidas penalidades.

O Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) [1] caracteriza os fenômenos de qualidade de energia, estabelecendo os critérios de amostragem, os valores de referência e os procedimentos relativos às qualidades do produto e do serviço. Os aspectos considerados da qualidade da energia elétrica em regime permanente ou transitório são: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência.

Dentre estes itens que são fiscalizados pela ANEEL, pode-se destacar a importância do nível de tensão que é disponibilizado pelas concessionárias aos seus consumidores. A “conformidade de tensão elétrica”, como definido no Módulo 8 do PRODIST, é obtida comparando um conjunto de leituras de tensão em regime permanente obtida por medição e metodologias apropriadas, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados. A conformidade dos níveis de tensão deve ser avaliada, nos pontos de conexão à Rede de Distribuição, nos pontos de conexão entre distribuidoras e nos pontos de conexão com as unidades consumidoras, por meio dos indicadores estabelecidos no Módulo 8.

A tensão de atendimento pode ser classificada como adequada, precária ou crítica, sendo que os limites para classificação dependem da tensão nominal de atendimento, conforme mostrado na Tabela 1. Segundo o Módulo 8 do PRODIST, para tensões nominais menores que 1 kV, são tolerados desvios de 3% das medidas de tensões precárias e um prazo estipulado à concessionária de 90 (noventa) dias para regularizar a situação. Já para a tensão crítica o desvio é de 0,5% e o prazo de regularização são 15 (quinze) dias. Caso o problema permaneça, multas serão aplicadas pelo serviço inadequado.

Tabela 1 - Classificação da tensão no ponto de entrega em tensão nominal até 1 kV

Tensão Nominal (TN)		Tensões Nominais Padronizadas		
Ligação	Volts	Faixa de Valores Adequados das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (V)	Faixa de Valores Precários das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (V)	Faixa de Valores Críticos das Tensões de Leitura (TL) em relação à TN (V)
Trifásica	(220)	$201 \leq TL \leq 231$	$189 \leq TL \leq 201$ ou $231 \leq TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$
	(127)	$116 \leq TL \leq 133$	$109 \leq TL \leq 116$ ou $133 \leq TL \leq 140$	$TL < 109$ ou $TL > 140$
	(380)	$348 \leq TL \leq 396$	$327 \leq TL \leq 348$ ou $396 \leq TL \leq 403$	$TL < 327$ ou $TL > 403$
	(220)	$201 \leq TL \leq 231$	$189 \leq TL \leq 201$ ou $231 \leq TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$
Monofásica	(254)	$232 \leq TL \leq 264$	$220 \leq TL \leq 232$ ou $264 \leq TL \leq 269$	$TL < 220$ ou $TL > 269$
	(127)	$116 \leq TL \leq 132$	$109 \leq TL \leq 116$ ou $132 \leq TL \leq 140$	$TL < 109$ ou $TL > 140$
	(440)	$402 \leq TL \leq 458$	$380 \leq TL \leq 402$ ou $458 \leq TL \leq 466$	$TL < 380$ ou $TL > 466$
	(220)	$201 \leq TL \leq 229$	$189 \leq TL \leq 201$ ou $229 \leq TL \leq 233$	$TL < 189$ ou $TL > 233$

Fonte: [1].

Ainda segundo o PRODIST, é importante destacar que o conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deverá compreender o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos. Os valores eficazes devem ser calculados a partir das amostras coletadas em janelas sucessivas, sendo que cada janela compreenderá uma sequência de doze ciclos (0,2 segundos) a quinze ciclos (0,25 segundos).

Sabe-se que níveis precários e críticos de tensão, em especial subtensões, causam diversos problemas para os consumidores, tais como: possível interrupção de equipamentos eletrônicos, redução do índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente, elevação do tempo de partida e da corrente de motores de indução, etc. Nesse sentido, alguns dispositivos têm sido utilizados para reduzir os problemas relacionados com níveis de tensão inadequados em redes de distribuição de energia, podendo-se citar: reguladores de tensão, ajuste na derivação de operação dos transformadores ou instalação de bancos de capacitores, com o objetivo de reduzir a parcela da queda de tensão relacionada com o fluxo de potência reativa [2][6].

Bancos de capacitores são normalmente utilizados para correção do fator de potência em redes de distribuição de energia elétrica. Estes equipamentos aumentam o rendimento da rede de distribuição, e entre seus benefícios também pode-se citar a redução da queda de tensão e a diminuição nas perdas de potência ativa. A conexão dos bancos de capacitores pode ser em série ou em paralelo. Para que o banco de capacitor tenha a eficiência desejada, é necessário que muitas análises sejam feitas, além de cautelosos estudos do dimensionamento e

operação destes equipamentos, mas principalmente, o local de instalação do mesmo na rede de distribuição. Se alocado em locais incorretos pode ocasionar problemas, como sobretensões e perdas nas linhas [7]. Esta abordagem também não apresenta a flexibilidade necessária em redes de distribuição nas quais se observam amplas variações de potência. Somado a isso, os bancos de capacitores são incapazes de atender ao problema de balanceamento de carga [8].

O ajuste de *taps* de transformadores também é uma das soluções utilizadas pelas concessionárias para regulação de tensão. Os transformadores possuem um mecanismo que promove um ajuste na sua relação de espiras, alterando a magnitude de tensão ou alterando o ângulo de fase da tensão de linha [7]. Grande parte dos transformadores utilizam *taps* mecânicos para ajustá-los. Logo, deve-se deslocar equipes de manutenção para os locais em que estão instalados, adicionando custos na operação do sistema. Recentemente, soluções empregando comutadores eletrônicos, também denominado *tap-changer*, têm sido desenvolvidas [9][10].

Os reguladores de tensão, outra solução normalmente utilizada, são autotransformadores que possuem ajustes automáticos de *tap*, permitindo elevar ou reduzir a tensão no lado secundário, mantendo-a dentro de uma faixa de valores aceitáveis para os consumidores. Os reguladores possuem várias entradas, permitindo a configuração da relação de transformação de acordo com a variação da tensão. Estes equipamentos são comumente instalados em pontos entre os alimentadores em que a tensão não consegue ser regulada pela subestação, compensando as variações de tensão do lado do primário e do secundário [7].

Entretanto, com esses equipamentos supracitados, não é garantido que a tensão fornecida aos consumidores seja mantida na faixa adequada durante todas as janelas de medição. Os consumidores conectados em baixa tensão não apresentam um sistema de regulação direto, pois a tensão normalmente é regulada na saída das subestações e, em algum outro ponto específico do alimentador. Além disso, se a carga apresentar variações significativas, as atuações dos reguladores de tensão serão pouco efetivas, segundo os critérios da ANEEL, pois os seus tempos de resposta são muito lentos quando comparados com a janela de amostragem da tensão. Este problema se agrava nas redes monofásicas de distribuição rurais, que apresentam grandes distâncias e, conseqüentemente, grandes impedâncias. Surge então a necessidade de um regulador para baixa tensão com rápida resposta transitória, capaz de atuar dentro dos limites impostos pela ANEEL e, assim, evitar que sejam registrados valores fora da faixa adequada.

Em uma tentativa de flexibilizar a operação para diferentes condições de carga e de melhorar a resposta dinâmica, outra solução que também tem sido empregada em sistemas de transmissão para adequar os níveis de tensão e controlar o fluxo de potência é a compensação de reativos, fazendo uso de conversores estáticos. Estes dispositivos são usualmente divididos em compensadores de baixa frequência, como os Compensadores Estáticos de Reativos (SVC – *Static VAR Compensator*), e de alta frequência, como os Compensadores Síncronos Estáticos (STATCOM – *Static Synchronous Compensator*). Os SVC utilizam comutação de tiristores, e, desta forma, podem injetar harmônicos de corrente de baixa frequência na rede e também têm um tempo de resposta na ordem de alguns ciclos da rede [11]. Por outro lado, um STATCOM emprega dispositivos semicondutores completamente controlados, que usualmente operam com modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) em alta frequência (na ordem de kHz). Dessa forma, os harmônicos de corrente são facilmente minimizados com filtros passivos reduzidos e o tempo de resposta do compensador é bastante rápido.

Embora o nome dado a um STATCOM seja semelhante à de um SVC, os dois equipamentos apresentam princípios distintos de operação. Ao contrário dos SVCs convencionais, em especial o Reator Controlado por Tiristor (TCR – *Thyristor Controlled Reactor*) e o Capacitor Chaveado por Tiristor (TSC – *Thyristor Switched Capacitor*), o STATCOM não depende de capacitores e reatores de significativo peso e volume para gerar ou absorver potência reativa. Além disso, um STATCOM pode controlar a corrente reativa injetada na rede independentemente da tensão da rede, ao contrário de um SVC, em que a máxima amplitude da corrente reativa depende diretamente da tensão do sistema, como mostrado na Figura 1. Ainda, como não há grandes capacitores ou reatores utilizados para gerar ou absorver potência reativa, o STATCOM proporciona uma resposta muito rápida e uma maior estabilidade a variações na impedância do sistema [12].

Além da aplicação em sistemas de transmissão, conversores estáticos também têm sido empregados para regulação de tensão em sistemas de distribuição, sendo algumas vezes aplicados para aumentar a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de um determinado consumidor/cliente (conceito *Custom Power* [13][14]). Em nível de sistemas de distribuição, as principais configurações encontradas para regulação de tensão são: DVR (*Dynamic Voltage Restorer*), D-STATCOM (*Distribution Static Synchronous Compensator*) e UPQC (*Unified Power Quality Compensator*).

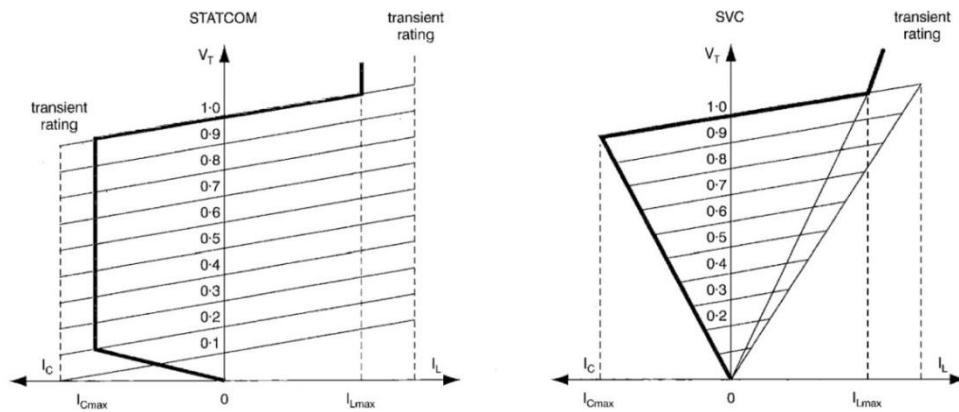


Figura 1 - Característica de tensão e corrente do STATCOM e do SVC

Fonte: [12].

O DVR é conectado em série com o sistema, como mostra a Figura 2, utilizando um transformador de acoplamento. Este equipamento é utilizado para eliminar harmônicos de tensão, balancear cargas e regular a tensão, contudo, apresenta problemas de proteção durante faltas. Processa menos potência em relação ao D-STATCOM, e com isso tem uma menor capacidade de corrigir afundamentos sem injetar qualquer potência ativa. Um dos maiores problemas do DVR está relacionado com a sua conexão ao PAC, pois, como o mesmo é conectado em série com o sistema, é necessário interromper rede para sua conexão [15][18].

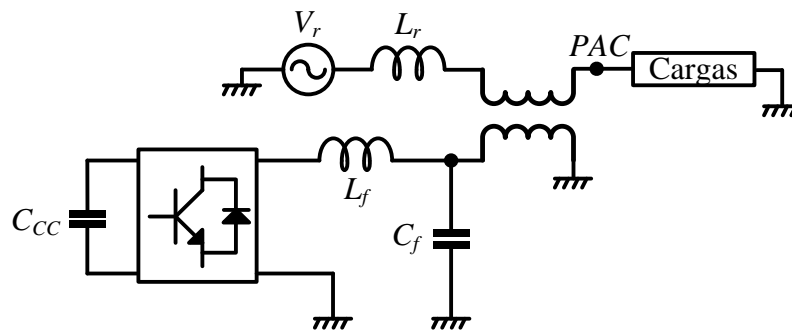


Figura 2 - DVR conectado à rede através do transformador de acoplamento

Por outro lado, similarmente ao STATCOM, o D-STATCOM é conectado em paralelo com o sistema, como mostra a Figura 3, e não necessita do transformador de acoplamento. Tem capacidade de corrigir o fator de potência, eliminar correntes harmônicas, balancear cargas, compensação de tensão e de potência reativa. Processa mais potência que o DVR, porém tem maior capacidade de corrigir afundamentos sem injetar qualquer potência ativa. Contudo, o sistema de controle deve garantir que a tensão do barramento CC permanece

regulada em seu valor nominal, uma vez que usualmente o barramento é implementado com capacitores eletrolíticos. Finalmente, o UPQC é uma união dos dois sistemas supracitados [15][18].

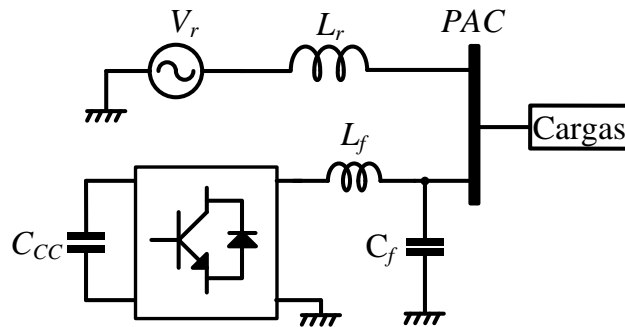


Figura 3 - D-STATCOM conectado á rede

Nesta Dissertação de Mestrado, optou-se por empregar um D-STATCOM para regulação de tensão em longas redes de distribuição monofásicas rurais, que possuem significativa impedância série, devido à sua conexão em derivação com a rede de distribuição e também devido à sua capacidade de corrigir afundamentos com rápida resposta transitória. Nesse sentido, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados à D-STATCOM, analisando o seu princípio de operação, comparações com outras configurações e, principalmente, o seu sistema de controle.

Gupta *et al* [19] desenvolveu uma análise e comparação do desempenho de um conversor alimentado em tensão, conectado tanto como DVR quanto D-STATCOM, para regulação de tensão. Um controle simples de tensão é usado para manter a tensão do barramento de carga, baseado em um controlador proporcional e um filtro passa-baixas. O comportamento do controle da tensão da carga usando D-STATCOM e DVR são analisados, comparando as características de rastreamento dos dois dispositivos de compensação para redes de distribuição fortes e fracas. Considerando uma rede forte, a resposta em frequência de malha fechada do controle da tensão da carga mostra que o DVR é mais eficaz que o D-STATCOM, o que também ocorre para perturbações na carga. Porém, para uma rede fraca, que está mais susceptível a apresentar problemas de regulação de tensão, ambos têm características semelhantes. Contudo, esse artigo não aborda a questão do controle da tensão do barramento CC.

Hosseini *et al* [20] propôs um novo método de controle para um D-STATCOM trifásico de doze pulsos, realizando realimentação do valor eficaz da tensão do PAC e

utilizando compensador do tipo PI (similar ao apresentado em [21]). Contudo, neste artigo, o ganho proporcional é armazenado em uma tabela e é modificado de acordo com a carga e com distúrbios na tensão da rede, visando uma otimização de desempenho do sistema.

Já o trabalho desenvolvido por Vasudevanaidu *et al* [21] faz uma análise comparativa baseada em simulações no Matlab/Simulink[®] de três equipamentos para regulação de tensão: DVR, D-STATCOM e Chave Estática de Estado Sólido (SSTS – *Solid-State Transfer Switch*). O sistema de controle empregado tanto no DVR quanto no D-STATCOM utiliza a realimentação do valor eficaz da tensão no ponto de conexão e emprega compensadores do tipo proporcional-integral (PI). Entretanto, o sistema de controle utilizado nesse trabalho resulta em fluxo de potência ativa e reativa pelo inversor PWM, sendo necessário o uso de uma fonte de energia para alimentar o barramento CC. Bongiorno *et al* [22] usa um D-STATCOM para mitigar afundamentos de tensão em sistemas trifásicos. O inversor PWM mantém a magnitude da tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) constante, injetando potência reativa para compensar a queda de tensão na impedância da linha. É empregado um sistema de controle em cascata, constituído por um controlador interno de corrente e um controlador externo de tensão, que calcula as referências de corrente para o PAC. O sistema de controle é implementado nos eixos de coordenadas dq, controlando os fluxos de potência reativa (tensão do PAC) e ativa (tensão do barramento CC). Além disso, o trabalho considera o uso de um filtro *LCL* ao invés de apenas um filtro *L* entre o inversor e a rede.

Ghosh *et al* [23] apresentou um compensador de tensão, baseado em um D-STATCOM com filtro *LC* de saída. O sistema de controle da tensão do PAC é baseado em realimentação de estados, utilizando controle ótimo do tipo LQR (*Linear Quadratic Regulator*). Além da medição da tensão no PAC e das correntes na rede e do inversor, o sistema apresentado também necessita da medição das correntes da carga para determinar as correntes de referência do D-STATCOM. Para controlar o barramento CC um compensador PI é utilizado.

Um D-STATCOM trifásico flexível operando tanto no modo de controle de tensão como no modo de controle de corrente foi proposto por Ledwich *et al* [24]. No modo de corrente pode-se cancelar a distorção causada pela carga, de modo que as correntes da rede são senoidais e equilibradas. Já no modo tensão, o D-STATCOM minimiza as distorções e garante o equilíbrio das tensões no PAC.

Diferentes estratégias de controle para um D-STATCOM foram propostas por Singh *et al* [25]. Várias técnicas de controle têm sido propostas, e este trabalho apresentou uma comparação de controladores PI e controladores por modos deslizantes, utilizando duas

estratégias de controle: Histerese e lógica PWM, para gerar os sinais de comando. O desempenho do PI e SMC são semelhantes em condições estáveis, mas variam em mudanças de cargas dinâmicas. Segundo o autor, quando os sinais de comando são gerados por Histerese as correntes instantâneas mantêm-se dentro da faixa de tolerância estipulada, porém a geração por PWM tem uma vantagem de ter uma frequência de comutação fixa. No entanto, pode haver erro de seguimento inerente que pode ser reduzido por meio do ajuste adequado do controlador PI. O SMC (*Sliding Mode Controllers*) é um controlador precisa de ajuste de quatro parâmetros, porém os mesmo são menos sensíveis à variações do sistema.

Outro trabalho de Singh *et al* [8] explorou o D-STATCOM controlado por uma rede neural baseada em referência de corrente. O artigo trata do controle de um D-STATCOM para balanceamento de carga com um fator de potência unitário ou para regulação de tensão usando banco de capacitores. No modo de correção do fator de potência, o D-STATCOM gera potência reativa apenas para operar o sistema com fator de potência unitário. No entanto, para regulação de tensão, o D-STATCOM fornece uma quantidade extra de potência reativa. O esquema de controle proposto utiliza um elemento de adaptação rápida linear, com base em rede neural, que extrai a componente de sequência positiva real sem qualquer mudança de fase. Para manter a tensão constante no barramento CC, no modo de regulação de tensão, um controlador PI é utilizado.

Em 2006, Eldery *et al* [26] projetou um controlador robusto adaptativo para um D-STATCOM que controla a fonte de tensão do inversor utilizando modulação por largura de pulso. As equações dinâmicas do D-STATCOM mostram que as não-linearidades e as incertezas do modelo do sistema têm grande contribuição na resposta dinâmica. Assim, uma estratégia de controle robusto, com base no modo de controle deslizante, que é uma abordagem padrão para lidar com as incertezas paramétricas de modelagem de um sistema não-linear é projetado. Neste caso, o projeto do controle robusto requer o conhecimento, com antecedência, do exato modelo das cargas nas proximidades do D-STATCOM. Portanto, o controle adaptativo falha para dar o mesmo desempenho em diferentes cargas ligadas ao ponto de acoplamento. Por isso há uma necessidade de um controlador, cujo desempenho não depende do modelo exato do sistema, ou seja, um controlador que é robusto em termos de incertezas paramétricas e imprecisões do sistema.

Madhusudan *et al* [27] apresentou em seu trabalho o modelo e simulação de um D-STATCOM com modulação por largura de pulso. O dispositivo é utilizado em redes de distribuição de energia para injetar uma corrente no sistema e corrigir a queda de tensão. O sistema de controle regula a tensão eficaz no ponto de acoplamento comum, utilizando um

compensador PI. O controle do barramento CC não é abordado pelos autores, pois utilizam uma fonte de tensão CC no barramento.

Menniti *et al* [28] utilizou um D-STATCOM trifásico aplicado em um sistema de geração distribuída, utilizando energia fotovoltaica e energia eólica. O controle da tensão no ponto de acoplamento comum é realizado através da compensação de reativos. Além disso, a tensão do barramento CC também é controlada. Em ambos os controladores o autor utilizou compensadores PI. Masdi *et al* [29] também utilizou um D-STATCOM trifásico para compensar cargas desequilibradas. A topologia utilizada é de um inversor 12 pulsos trifásico e para implementar o controle os autores utilizaram um DSP.

Em virtude e do exposto neste capítulo, o objetivo desta Dissertação de Mestrado é desenvolver um regulador de tensão monofásico, com configuração D-STATCOM, que será conectado em paralelo com o ponto de acoplamento comum. O compensador será utilizado como uma solução imediata para manter a tensão nos níveis adequados, evitando que penalidades sejam aplicadas à concessionária e garantindo uma tensão adequada aos consumidores, permanecendo conectado à rede até que uma solução definitiva seja implementada.

Um filtro *LC* é utilizado para reduzir os harmônicos de corrente produzidos pelo inversor. Esse filtro *LC*, juntamente com a impedância da rede, podem ser visualizados como um filtro *LCL* entre o inversor PWM e a rede. Porém, tais sistemas requerem estratégias de controle complexas e que não são comumente detalhadas na literatura para esta aplicação [30], a fim de satisfazer as especificações impostas pela aplicação e manter a estabilidade do sistema, uma vez que o filtro *LCL* produz frequências de ressonância indesejadas. A técnica de amortecimento passivo, onde uma resistência série é conectada no capacitor do filtro *LC*, apresenta grandes perdas e um custo adicional ao sistema. Desta forma, é vantajoso modificar os algoritmos de para obter amortecimento ativo da ressonância do filtro *LCL* [31]. Portanto, neste trabalho uma técnica de amortecimento ativo é utilizada para eliminar esta ressonância.

Para que os níveis de tensão definidos pela ANEEL sejam adequados, o sistema de controle do D-STATCOM deve garantir que a sua tensão de saída, que é a mesma do PAC, permaneça dentro dos limites mesmo com grandes variações de carga e da impedância da linha. Assim, esta Dissertação de Mestrado também propõe um sistema de controle digital para o D-STATCOM, regulando a tensão no PAC e a tensão do barramento CC do inversor PWM. Apesar de existirem estudos sobre estratégias de controle para inversores PWM trifásicos com filtro *LCL*, não existem trabalhos que realizam uma cuidadosa análise da

configuração completa do sistema de controle quando o inversor PWM opera como D-STATCOM monofásico.

1.1 Organização da dissertação

A Dissertação, em linhas gerais, é apresentada da seguinte forma: No Capítulo 2 é apresentada uma descrição do sistema de regulação, seu princípio de funcionamento bem como uma análise do fluxo de potência no sistema em análise. A partir dessa análise, é apresentado um estudo do comportamento da potência reativa do inversor para diferentes situações, tais como: tipos de cargas, variações da impedância da linha e amplitude da tensão a ser regulada.

No Capítulo 3 é mostrada a modelagem do sistema em tempo contínuo e discreto e o sistema de controle proposto, englobando a malha de controle CA e a malha de controle CC. Resultados de simulação e uma análise com variações paramétricas são também apresentadas neste capítulo.

Os resultados experimentais, que buscam comprovar a eficácia do sistema de controle proposto, são apresentados no Capítulo 4. Testes com variações de carga e variações paramétricas da rede são expostos para que seja possível uma comparação com os resultados de simulação.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais deste trabalho bem como as propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REGULAÇÃO DE TENSÃO

O problema de regulação de tensão é assunto constante nas concessionárias e em setores de pesquisa, uma vez que deve-se garantir um suprimento de qualidade e dentro dos limites impostos pelos órgãos de fiscalização. Por estes motivos, a ANEEL vem reformulando suas resoluções e recentemente criou o PRODIST, dividido em oito Módulos, sendo que o Módulo 8 é especificamente de Qualidade de Energia.

Os consumidores rurais são os mais afetados pelo problema de regulação de tensão, pois os dispositivos de regulação utilizados estão conectados a longas distâncias dos mesmos, e as redes de energia utilizadas para o fornecimento são longas. Desta forma, para evitar as possíveis penalidades, a concessionária necessita de um equipamento de fácil instalação e rápida atuação, utilizado como uma solução temporária, desta forma é possível o desenvolvimento de um estudo para a melhoria da rede e a implantação da solução definitiva.

Neste capítulo será apresentado o problema de regulação de tensão para longas linhas em função da variação da carga e outros parâmetros, como por exemplo a impedância da linha. Além disso, a estrutura do regulador analisado é apresentada bem como seu principio de funcionamento e para finalizar o capítulo uma análise do comportamento da potência reativa que será fornecida pelo inversor, assim como seus limites de atuação.

2.1 Problema de regulação de tensão

Em sistemas com longas linhas de distribuição, a tensão fornecida aos consumidores usualmente apresenta grandes variações, podendo inclusive permanecer em níveis precários ou críticos. Nesse sentido, esta seção apresenta algumas análises normalizadas do comportamento da tensão no PAC em função da variação da carga e da impedância da rede de distribuição. Para essas análises considerou-se o circuito apresentado na Figura 4.

Inicialmente, a tensão no PAC foi avaliada com a variação da carga. A Figura 5 mostra a amplitude da tensão do PAC com a variação da potência e do fator de potência da carga. A amplitude da tensão da rede foi mantida em 1 pu e a impedância da linha apresenta módulo de 0,2 pu e a razão R_r/X_r é unitária. Verifica-se que para cargas indutivas e resistivas próximas ao valor nominal, a tensão no PAC tende a ficar fora dos limites adequados

impostos pelo PRODIST. Já para cargas capacitivas, a tendência é que a tensão aumente acima de 1 pu.

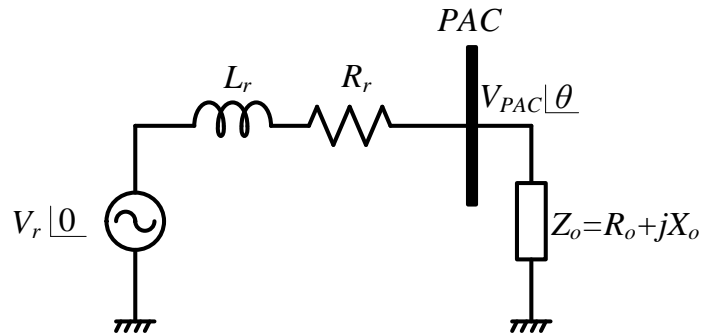


Figura 4 - Circuito simplificado para análise da tensão no PAC

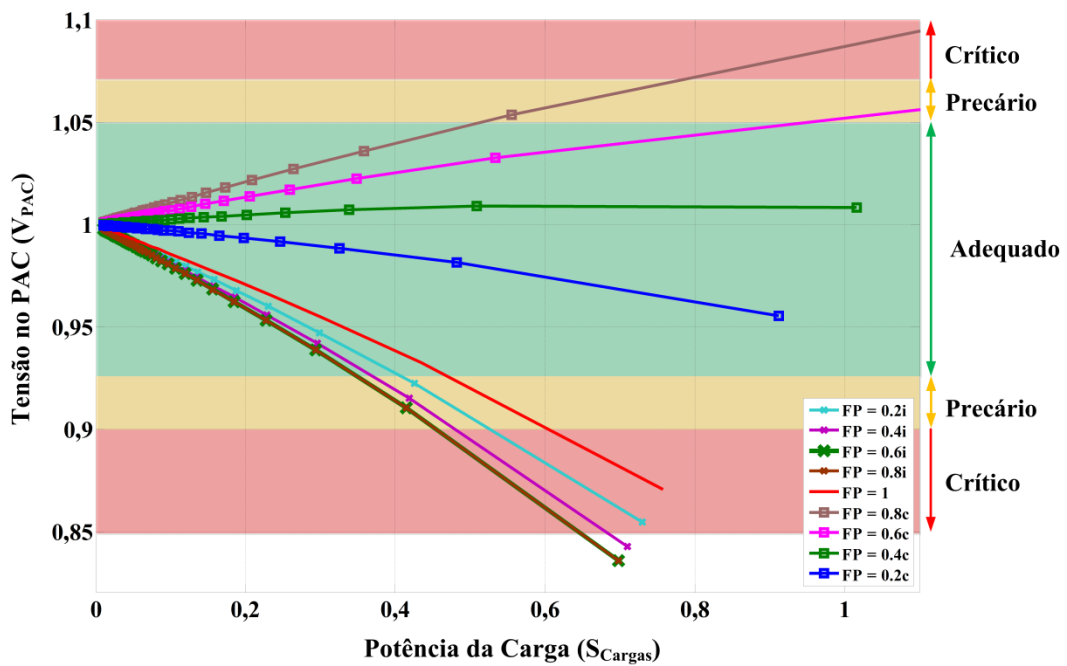


Figura 5 - Tensão no PAC versus potência na carga ($V_r = 1$ pu, $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu)

Uma segunda análise foi realizada, mantendo a tensão na rede em 1 pu, usando uma carga resistiva de 1 pu e variando a impedância da linha, tanto em módulo quanto em ângulo (razão R/X). A Figura 6 mostra a tensão no PAC, onde cada curva representa um ângulo diferente da impedância de linha. Nota-se que conforme o módulo da impedância da linha aumenta, a tensão fica fora dos limites impostos pela ANEEL para tensão adequada, dentre os ângulos analisado, o pior caso é quando a linha torna-se resistiva.

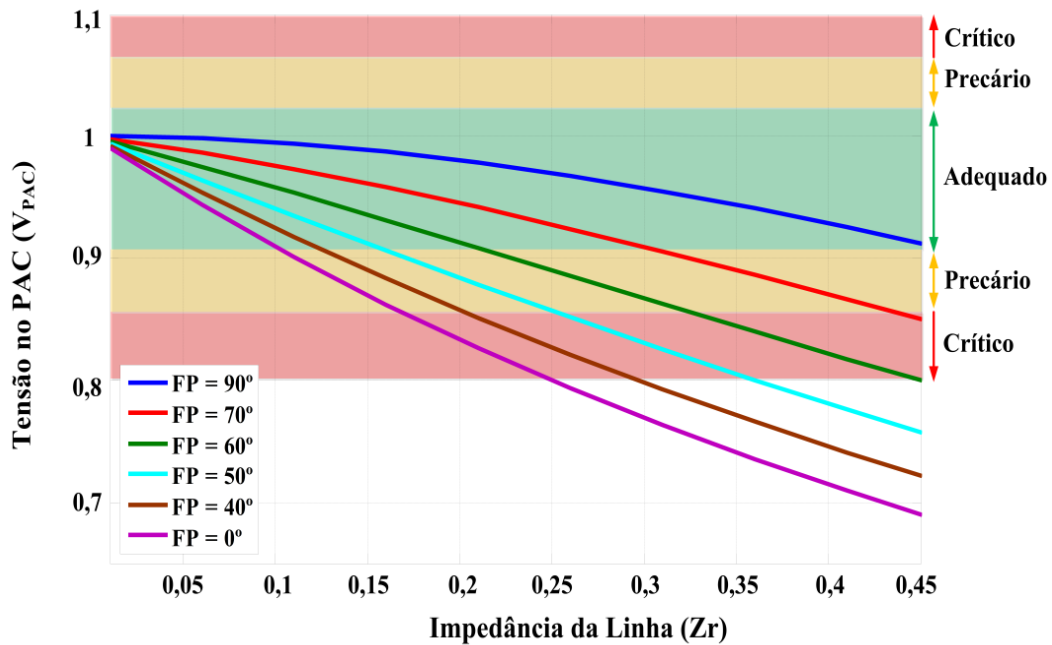


Figura 6 - Tensão no PAC *versus* Impedância da linha ($V_r = 1$ pu, $S_o = 1$ pu, $FP_o = 1$)

2.2 Estrutura do regulador de tensão

Através dos resultados obtidos na seção anterior, é possível destacar o quão a tensão no PAC é influenciada pela variação de carga e da impedância da linha. Nesse sentido, pode-se notar a importância de um dispositivo para regular imediatamente a tensão no PAC. Pois sem o mesmo o fornecimento da concessionária não atenderia os limites impostos pelo PRODIST. Além disso, com estes resultados fica claro que, quanto maior for a impedância da linha, ou seja, quanto mais longa, maior é a queda de tensão da tensão no PAC.

Contudo, este trabalho utiliza um D-STATCOM para regular a tensão no PAC, e propõem um sistema de controle rápido e robusto. O diagrama do sistema sob análise é apresentado na Figura 7, sendo composto por três partes principais: a rede, as cargas e o D-STATCOM.

A rede monofásica é simplesmente modelada por uma fonte de tensão em série com uma impedância com componentes indutiva (L_r) e resistiva (R_r). As cargas representam os consumidores conectados ao barramento do PAC.

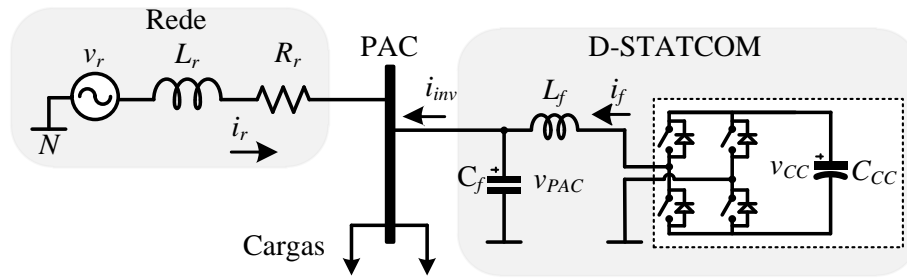


Figura 7 - Diagrama do sistema sob análise

O D-STATCOM atua como regulador de tensão e é composto por um inversor monofásico em ponte completa alimentado em tensão e modulado por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) em alta frequência. O inversor PWM é conectado em paralelo com o ponto de acoplamento comum através de um filtro de segunda ordem ($L_f C_f$) para reduzir os harmônicos de alta frequência produzidos pelas comutações dos interruptores do inversor.

Para analisar o princípio básico de funcionamento do sistema sob análise é possível substituir o D-STATCOM por uma fonte de tensão CA controlada, como mostrado na Figura 8.

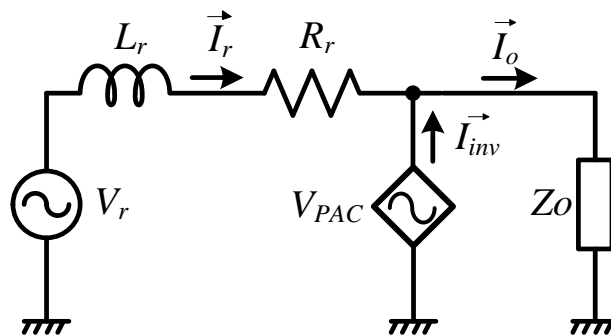


Figura 8 - Diagrama simplificado do sistema sob análise

Observando a Figura 8 pode-se perceber que a tensão no PAC é imposta pela tensão de saída do D-STATCOM. Dessa forma, para que o nível de tensão disponibilizado para os consumidores seja adequado, o sistema de controle do inversor PWM monofásico deve garantir que a sua tensão de saída, que é a mesma do PAC, permaneça dentro dos limites adequados mesmo com grandes variações de carga e da rede de alimentação. Além disso, como o barramento CC é formado apenas por capacitores, idealmente a fonte de tensão controlada que representa o D-STATCOM não pode fornecer nem consumir potência ativa para manter os capacitores regulados em sua tensão CC nominal. Na prática, uma pequena

parcela de potência ativa deve ser consumida pelo D-STATCOM para compensar as perdas elétricas existentes no conversor e, assim manter a tensão do barramento CC regulada. Esse ajuste da potência ativa processada pelo inversor pode ser realizado através do ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão no ponto de acoplamento, sendo que esse ângulo também deve ser determinado pelo sistema de controle do D-STATCOM.

Dessa forma, o D-STATCOM deve processar essencialmente potência reativa, de acordo com as características da rede de alimentação e das cargas, a fim de manter regulada a tensão no ponto de acoplamento comum.

2.3 Análise em regime permanente senoidal do sistema de regulação de tensão

A Figura 8 mostra um circuito simplificado do sistema sob estudo, sendo o inversor PWM monofásico e o filtro LC substituídos por uma fonte de tensão controlada em paralelo com o PAC.

Com o intuito de representar a variação da carga, a mesma é definida através da sua potência aparente e do seu fator de potência (ângulo de defasagem da carga).

2.3.1 Cálculos das correntes

A corrente na carga é dada por:

$$\vec{I}_o = \frac{\vec{V}_{PAC}}{Z_o} \quad (1)$$

Por outro lado, a corrente na linha de distribuição pode ser dada por:

$$\vec{I}_r = \frac{\vec{V}_r - \vec{V}_{PAC}}{Z_r} \quad (2)$$

Onde $Z_r = R_r + j\omega L_r$ é a impedância série da rede. Aplicando a lei de *Kirchhoff* das correntes no PAC obtém-se que:

$$\vec{I}_{inv} = \vec{I}_o - \vec{I}_r \quad (3)$$

Substituindo (1) e (2) em (3) obtém-se:

$$\vec{I}_{inv} = \frac{\vec{V}_{PAC} (Z_o + Z_r) - Z_o \vec{V}_r}{Z_o Z_r} \quad (4)$$

2.3.2 Cálculo da potência da rede de distribuição

Após determinar a corrente da rede, a sua potência aparente pode ser calculada utilizando a seguinte equação.

$$\vec{S}_r = \vec{V}_r \cdot \vec{I}_r^* \quad (5)$$

Onde \vec{I}_r^* é o complexo conjugado de \vec{I}_r . Substituindo (2) em (5) e transformando \vec{V}_{PAC} para a forma retangular, pode-se demonstrar que:

$$\vec{S}_r = \frac{V_r (V_r - V_{PAC} \cos \theta + j V_{PAC} \text{sen } \theta) (R_r + j X_r)}{R_r^2 + X_r^2} \quad (6)$$

Além disso, pode-se obter as potências ativa P_r e reativa Q_r da rede separando a equação (6) em parte real e imaginária, então:

$$P_r = \frac{V_r(R_r V_r - R_r V_{PAC} \cos \theta - X_r V_{PAC} \sin \theta)}{R_r^2 + X_r^2} \quad (7)$$

$$Q_r = \frac{V_r(X_r V_r - X_r V_{PAC} \cos \theta + R_r V_{PAC} \sin \theta)}{R_r^2 + X_r^2} \quad (8)$$

Pode-se observar que ambas as potências dependem da amplitude das tensões, da impedância da rede assim como do ângulo da tensão no PAC.

2.3.3 Cálculo da potência da carga

A potência aparente da carga pode ser obtida por:

$$\vec{S}_o = \vec{V}_o \cdot \vec{I}_o^* \quad (9)$$

Substituindo (1) em (9), tem-se que:

$$\vec{S}_o = \frac{V_{PAC}^2 R_o}{R_o^2 + X_o^2} + j \frac{V_{PAC}^2 X_o}{R_o^2 + X_o^2} \quad (10)$$

Separando as partes real e imaginária de (10) pode-se obter as potências ativa P_o e reativa Q_o da carga, dadas por:

$$P_o = \frac{V_{PAC}^2 R_o}{R_o^2 + X_o^2} \quad (11)$$

$$Q_o = \frac{V_{PAC}^2 X_o}{R_o^2 + X_o^2} \quad (12)$$

2.3.4 Cálculo da potência na impedância da linha

A potência aparente associada à impedância da linha de distribuição é dada por:

$$\vec{S}_l = \vec{V}_l \cdot \vec{I}_r^* \quad (13)$$

Onde $\vec{V}_l = \vec{V}_r - \vec{V}_{PAC}$ é a queda de tensão na impedância da linha de distribuição. Substituindo (2) em (13) pode-se demonstrar que:

$$\vec{S}_l = \frac{R_r(V_r^2 + V_{PAC}^2 - 2V_r V_{PAC} \cos \theta)}{R_r^2 + X_r^2} + j \frac{X_r(V_r^2 + V_{PAC}^2 - 2V_r V_{PAC} \cos \theta)}{R_r^2 + X_r^2} \quad (14)$$

Novamente, separando as partes real e imaginária de (14) pode-se obter as potências ativa P_l e reativa Q_l referentes a impedância da linha de distribuição, dadas por:

$$P_l = (V_r^2 + V_{PAC}^2 - 2V_r V_{PAC} \cos \theta) \frac{R_r}{R_r^2 + X_r^2} \quad (15)$$

$$Q_l = (V_r^2 + V_{PAC}^2 - 2V_r V_{PAC} \cos \theta) \frac{X_r}{R_r^2 + X_r^2} \quad (16)$$

2.3.5 Determinação do ângulo θ

O princípio de conservação de energia pode ser empregado para determinar o ângulo de defasagem da tensão do PAC. Assumindo que o inversor *PWM* é ideal, ou seja, não possui perdas, a sua potência ativa P_{inv} deve ser nula para manter a tensão do barramento constante. Logo:

$$P_r - P_l - P_o = 0 \quad (17)$$

Substituindo (7), (11) e (15) em (17) obtém-se que:

$$\frac{R_r V_r \cos \theta - X_r V_r \sin \theta - R_r V_{PAC}}{R_r^2 + X_r^2} - \frac{R_o V_{PAC}}{R_o^2 + X_o^2} = 0 \quad (18)$$

Aplicando um método numérico para resolver a equação transcendental (18) é possível determinar o ângulo θ para diferentes amplitudes de tensão e impedâncias de linha e de carga.

2.3.6 Cálculo da potência reativa do inversor

Com a obtenção do ângulo θ , por meio da equação (19), é possível saber quanto de potência reativa o inversor deve fornecer a rede. Sabendo que:

$$\vec{S}_{inv} = \vec{V}_{PAC} \cdot \vec{I}_{inv}^* \quad (19)$$

Uma vez que o ângulo θ é obtido para manter a potência ativa processada pelo inversor PWM nula, o mesmo somente processa potência reativa. Substituindo a equação da corrente do inversor apresentada em (4) em (19), tem-se:

$$Q_{inv} = \frac{V_{PAC}^2 [X_o(R_r^2 + X_r^2) + X_r(R_o^2 + X_o^2)] - V_r V_{PAC} (R_o^2 + X_o^2) [X_r \cos \theta + R_r \sin \theta]}{(R_r^2 + X_r^2)(R_o^2 + X_o^2)} \quad (20)$$

2.3.7 Análise

Essa subseção apresenta uma análise quantitativa normalizada do ângulo de defasagem θ da tensão do PAC e da potência reativa processada pelo inversor para diferentes condições de rede e de carga. Os valores base empregados nessa análise são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores base adotados

Descrição	Valor
Tensão base	220 V _{RMS}
Potência base	1 kVA

A Figura 9 apresenta o valor do ângulo de fase θ da tensão do PAC, obtido a partir de (18), que garante que o inversor PWM ideal não processa potência ativa, para diferentes valores de potência e fator de potência de carga. Percebe-se que o valor do ângulo de atraso da tensão do PAC aumenta com o acréscimo de carga e para cargas com característica resistiva. Também se observou que o comportamento é idêntico para cargas com mesmo valor de fator de potência, independente se indutivas ou capacitivas. Esse gráfico foi obtido considerando que as amplitudes das tensões da rede e do PAC são iguais a 1 pu, que o módulo da impedância de linha é igual a 0,2 pu e que a relação R_r/X_r é unitária, de tal forma que $Z_r=0,1414 +j 0,1414$ pu. Contudo, de forma similar, outros gráficos também podem ser obtidos para analisar o ângulo de fase da tensão do PAC com variação desses parâmetros.

Uma vez conhecido o ângulo de defasagem da tensão do PAC pode-se determinar a quantidade de potência reativa processada pelo inversor PWM, indispensável para o correto dimensionamento do mesmo. A seguir, o comportamento da potência reativa do inversor é avaliado para diferentes condições de rede e de carga.

i) Variação da potência reativa Q_{inv} do inversor com a carga

A Figura 10 mostra a potência reativa processada pelo inversor PWM com a variação da carga conectada ao PAC, sendo que cada curva representa um fator de potência da carga distinto. Nessa análise, as amplitudes das tensões da rede e do PAC foram mantidas constantes e iguais a 1 pu. A impedância da rede de distribuição foi mantida constante e igual à $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu.

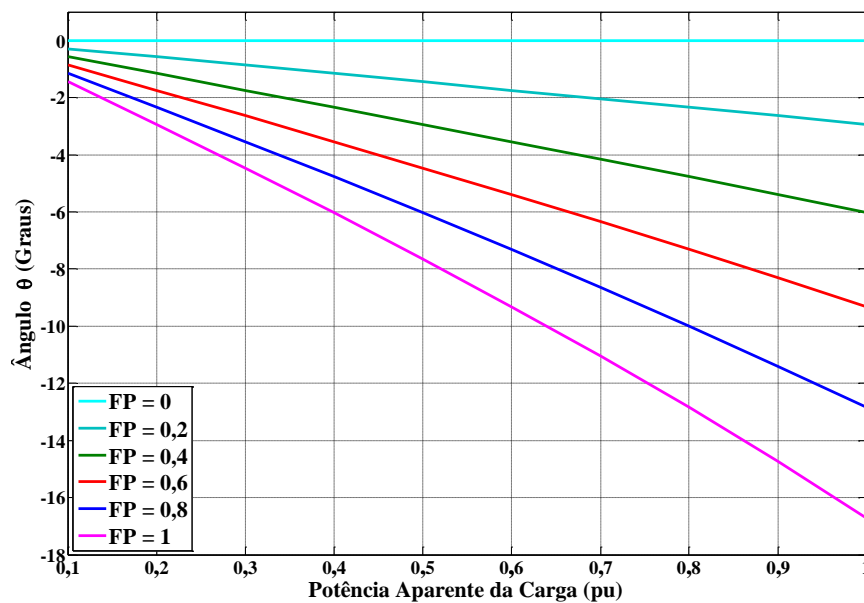


Figura 9 - Variação do ângulo θ com a carga ($V_r = 1$ pu; $V_{PAC} = 1$ pu; $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu)

Conforme esperado, na maioria das curvas apresentadas, a potência reativa processada pelo inversor aumenta com o acréscimo de carga, para compensar a queda de tensão na impedância da linha. Esse fato somente não é observado para uma pequena faixa de cargas capacitivas (fator de potência da carga em torno de 0,6) em que a tensão do PAC é adequada mesmo com carga nominal. Também se pode observar que a potência reativa processada pelo inversor é significativa, chegando a ultrapassar 1,5 pu, para cargas resistivas e indutivas próximas dos valores nominais.

ii) Variação da potência reativa Q_{inv} do inversor com a amplitude da tensão do PAC

A Figura 11 apresenta o módulo da potência reativa processada pelo inversor PWM com variação de carga resistiva conectada ao PAC, sendo que agora cada curva representa uma diferente amplitude da tensão no PAC. Nessa análise, a amplitude da tensão da rede foi mantida igual a 1 pu e a impedância da rede foi mantida igual à $Z_r=0,14 + j0,14$ pu. Percebe-se que a potência reativa do inversor diminui significativamente com a redução da amplitude da tensão do PAC. Dessa forma, uma vez que a amplitude da tensão do PAC é definida pelo sistema de controle do D-STATCOM, pode-se utilizar um sistema supervisorório para manter a tensão do PAC em níveis adequados e também reduzir a potência reativa processada pelo inversor abaixo de limites pré-estabelecidos.

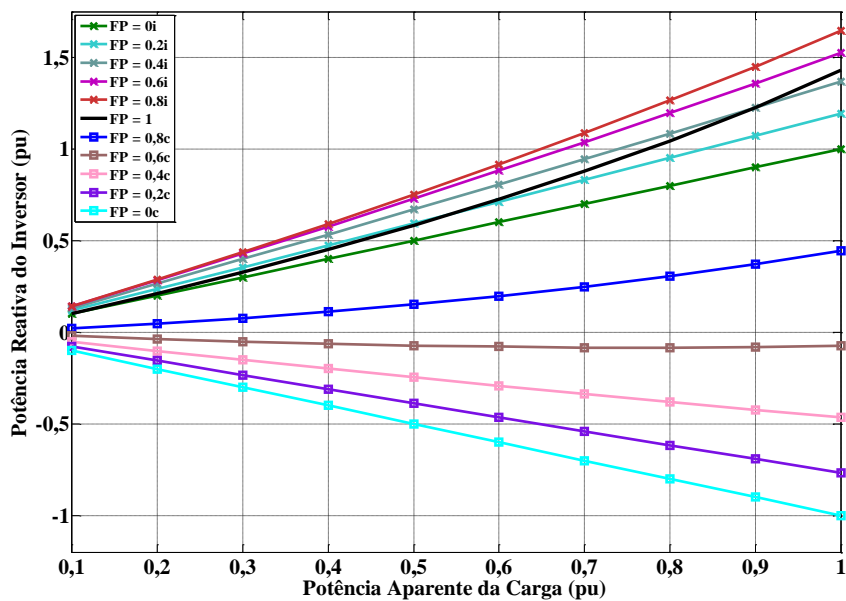


Figura 10 - Variação da potência reativa Q_{inv} processada pelo inversor com a carga ($V_r = 1$ pu; $V_{PAC} = 1$ pu; $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu)

Já a Figura 12 mostra a potência reativa processada pelo inversor PWM com variação da amplitude da tensão do PAC, considerando que a carga resistiva nominal está conectada ao PAC. Pode-se observar que a redução da amplitude da tensão do PAC em 5 % (de 1 pu para 0,95 pu) resulta em uma diminuição em torno de 40 % da potência reativa processada pelo inversor PWM.

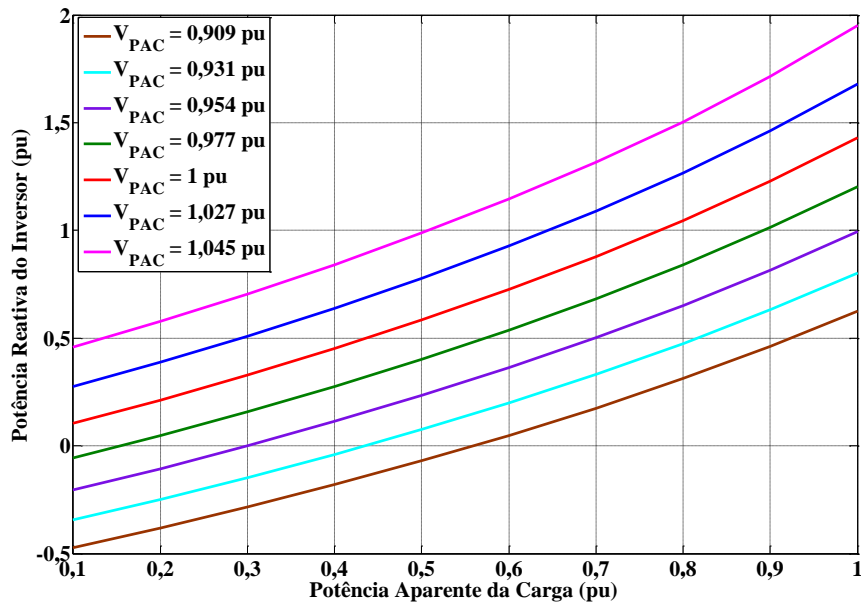


Figura 11 - Variação da potência reativa Q_{inv} processada pelo inversor com a carga, para diferentes tensões no PAC ($V_r = 1$ pu; $FP_o = 1$; $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu)

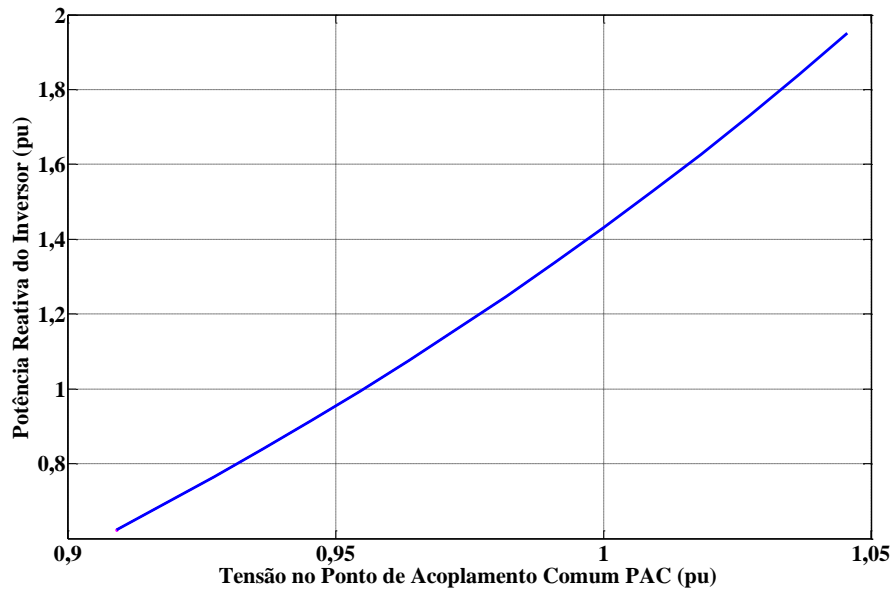


Figura 12 - Variação da potência reativa Q_{inv} processada pelo inversor com a tensão no PC, com potência nominal ($V_r = 1$ pu; $FP_o = 1$; $Z_r = 0,14 + j0,14$ pu)

i) Variação da potência reativa Q_{inv} do inversor com a impedância da linha

As análises apresentadas anteriormente consideram apenas uma condição para a impedância da linha Z_r , com módulo de 0,2 pu e razão R_r/X_r igual a 1. Contudo, na prática esta impedância varia conforme o tipo e o tamanho da rede sob análise. Neste contexto, a

Figura 13 mostra a quantidade de potência reativa processada pelo inversor PWM para diferentes módulos e ângulos α da impedância da linha de distribuição monofásica, considerando que as amplitudes das tensões da rede e do PAC são iguais a 1 pu e que a carga resistiva nominal é conectada ao PAC.

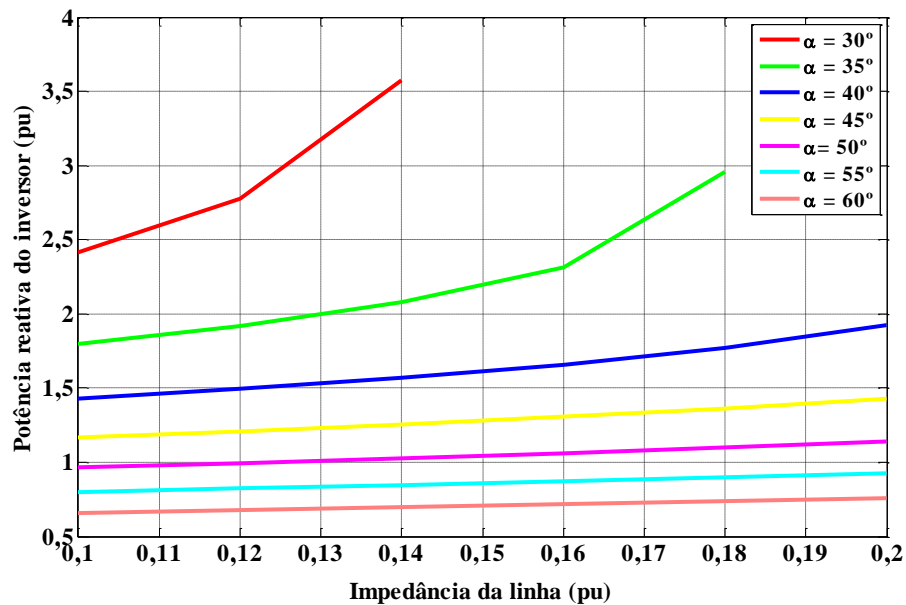


Figura 13 - Relação entre Q_{inv} e Z_r ($V_r = 1pu$; $FP = 1$; $R_r = 0,14$)

Conforme esperado, observa-se que a potência reativa processada pelo D-STATCOM aumenta para maiores valores da impedância da linha, uma vez que é necessário compensar a queda de tensão nessa impedância. Além disso, também se pode verificar que para ângulos menores da impedância de linha, ou seja, linhas de distribuição com características resistivas, a potência reativa processada pelo inversor PWM cresce significativamente para manter a tensão no PAC regulada. Para algumas faixas de parâmetros, mais especificamente para pequenos ângulos da impedância de linha e grandes valores de impedância, não existe solução real para o ângulo θ e, portanto, o inversor PWM não consegue manter as tensões no PAC e no barramento CC simultaneamente reguladas para essas condições de rede e de carga.

2.4 Conclusões parciais

Este capítulo abordou o problema de regulação de tensão, focado em longas linhas rurais de distribuição, mostrando qual é o comportamento da tensão no PAC quando nenhum sistema de regulação está conectado, e comparando-o aos limites impostos pela ANEEL.

Também foi apresentada a estrutura do regulador de tensão e seu princípio básico de funcionamento. Com isso, uma análise em regime permanente foi desenvolvida, e assim obter as correntes do circuito e as respectivas potências ativa e reativa.

Aplicando o princípio da conservação de energia e considerando que a potência ativa consumida pelo inversor é nula, foi possível encontrar o ângulo θ para diferentes amplitudes de tensão e impedâncias de linha e de carga. Este ângulo é a defasagem da tensão no PAC, e com o mesmo é possível controlar o fluxo de potência ativa e manter a tensão do barramento CC carregada.

Além disso, neste capítulo também foi obtida a potência reativa processada pelo D-STATCOM, o que permite dimensionar o inversor PWM e também obter os gráficos que demonstram qual sua capacidade de operação. Com estas informações também foi possível avaliar o impacto das variações da linha de distribuição e dos tipos de cargas conectadas a rede.

CAPÍTULO 3 SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO

No Capítulo 2 foi demonstrado que um inversor PWM conectado em paralelo com o PAC pode ser empregado para manter a tensão no PAC em níveis adequados, essencialmente injetando ou absorvendo potência reativa da rede de distribuição. Dessa forma, para um correto funcionamento do sistema de regulação, o sistema de controle do inversor PWM deve garantir que a tensão do PAC seja mantida em níveis adequados assim como manter a tensão do seu barramento CC regulada.

Nesse sentido, o Capítulo 3 apresenta o sistema de controle digital proposto para o D-STATCOM. Também são obtidos os modelos dinâmicos necessários para o correto projeto desse sistema de controle. Um exemplo de projeto e resultados de simulação também são incluídos para demonstrar o bom desempenho do sistema de controle proposto na regulação da tensão do PAC, mesmo com variações paramétricas e distúrbios na carga.

3.1 Descrição do sistema de controle digital proposto

A Figura 14 apresenta um diagrama simplificado do sistema sob estudo, incluindo o D-STATCOM com o sistema de controle digital proposto nesta Dissertação.

O D-STATCOM adotado neste trabalho é flexível quanto ao seu modo de controle, que pode ser em tensão ou em corrente [24]. Uma vez que o sistema de controle deve assegurar que a tensão do PAC permaneça em níveis adequados, mesmo sob as variações de carga, da impedância da linha ou da tensão da rede, o modo de controle direto da tensão é adotado nesse trabalho.

O sistema de controle do inversor PWM tem três funções básicas:

- controle da sua tensão de saída (tensão do PAC);
- regulação da tensão do barramento CC;
- amortecimento ativo da ressonância do filtro *LCL*, formado pelo filtro passa-baixas de saída do inversor PWM e pela impedância da rede.

Antes de realizar o projeto dos compensadores que compõem as malhas de controle da tensão do PAC e da tensão do barramento CC, deve-se garantir que a ressonância do filtro *LCL* seja adequadamente amortecida.

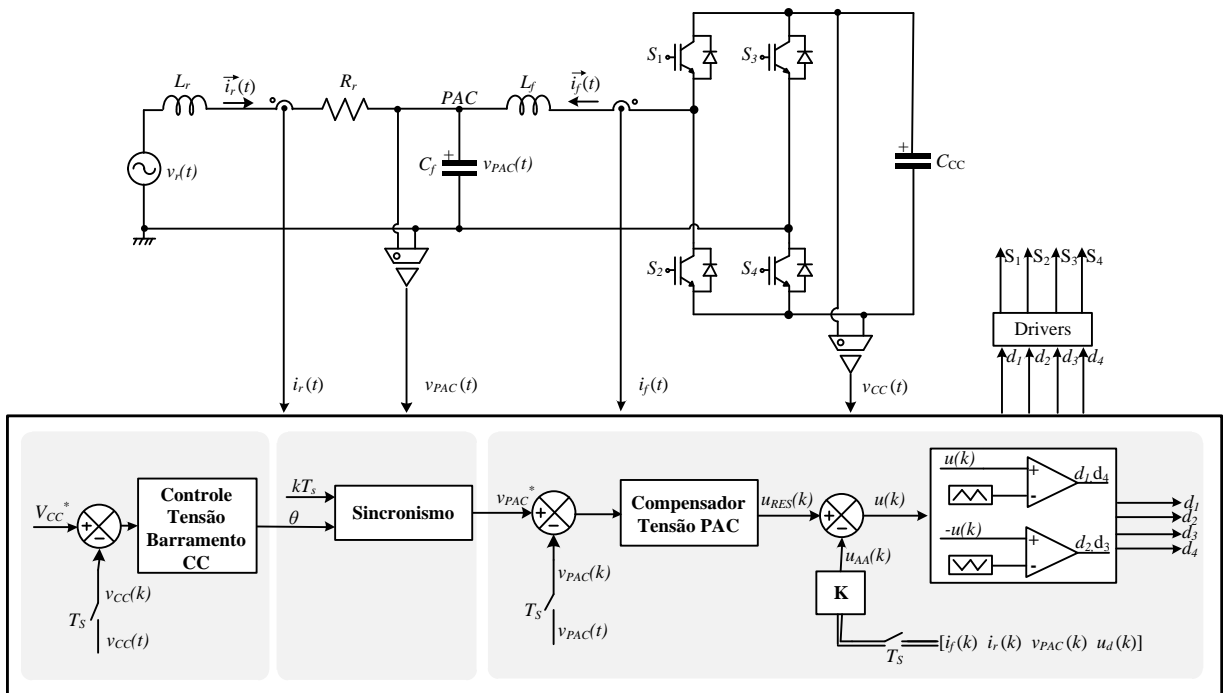


Figura 14 - Diagrama simplificado do sistema sob estudo, incluindo o D-STATCOM operando em malha fechada

Esse amortecimento pode ser realizado tanto de forma passiva (empregando resistores) ou ativa (utilizando técnicas de controle). Neste trabalho optou-se por uma técnica ativa de amortecimento, evitando o uso de resistores e, dessa forma, não penalizando o rendimento do D-STATCOM.

Dentre diversas técnicas de amortecimento ativo existentes na literatura [32][33], optou-se pelo uso de retroação total de estados, que permite que os polos do sistema em malha fechada sejam alocados em regiões com coeficiente de amortecimento adequado. A Figura 14 mostra que as correntes da rede e do inversor, assim como a tensão do PAC e um estado adicional u_d , que representa o atraso para atualização do sistema de controle [34], são realimentados através de uma matriz de ganhos \mathbf{K} para realizar o amortecimento ativo da ressonância do filtro LCL . Assim, o sistema em malha fechada composto pelo inversor PWM com filtro LCL (formado pelo filtro LC e pela impedância da rede) e pela retroação total de estados pode ser considerado um novo sistema (planta) amortecido, como destacado na Figura 14.

Para realizar o controle da tensão de saída do inversor, é utilizada uma malha de controle em que a tensão do PAC é comparada com um sinal de referência, e o sinal de erro resultante é processado por um compensador, que gera o sinal de controle para o sistema amortecido. De outra forma, pode-se também considerar que o sinal de controle do inversor

PWM é composto de duas parcelas, sendo uma parcela produzida pelo controlador da tensão do PAC e outra referente ao amortecimento ativo da ressonância do filtro *LCL*. Neste trabalho, como deseja-se sintetizar uma tensão senoidal no PAC, um compensador ressonante é empregado para esta malha de tensão, garantindo erro nulo em regime permanente [35].

Por outro lado, a regulação da tensão do barramento CC é realizada a partir do controle do fluxo de potência ativa pelo inversor PWM. No Capítulo 2 foi demonstrado que a potência ativa processada pelo inversor pode ser ajustada pelo ângulo de defasagem θ entre a tensão da rede e a tensão no PAC. Nesse sentido, outra malha de controle é adicionada ao sistema com o objetivo de determinar esse ângulo de defasagem. Nessa malha, a tensão do barramento CC é comparada com seu valor de referência e o sinal de erro resultante é processado por um compensador, que gera o ângulo de defasagem θ adequado. Esse ângulo é usado para gerar o sinal de referência da tensão do PAC através de uma função senoidal com a amplitude desejada, sincronizada com a tensão da rede, como mostrado na Figura 14. Dessa forma, apenas uma pequena quantidade de potência ativa é processada pelo D-STATCOM para compensar as suas perdas e assim manter regulada a tensão do barramento CC. Convém destacar que a banda passante da malha de regulação da tensão CC deve ser lenta para garantir que as malhas de tensão estejam dinamicamente desacopladas e também para não distorcer o sinal de referência da tensão do PAC.

Na próxima seção é realizada a modelagem dinâmica do sistema apresentado na Figura 14, possibilitando realizar o projeto dos compensadores e a análise do sistema de controle digital proposto.

3.2 Modelagem dinâmica

Para realizar o projeto dos compensadores que compõem o sistema de controle apresentado na Figura 14 são necessários dois modelos dinâmicos. Um deles, chamado neste trabalho de modelo do lado CA, deve descrever matematicamente a relação entre o sinal de controle do inversor, proveniente das malhas de amortecimento ativo e de controle da tensão do PAC, e as variáveis CA do sistema (tensão no PAC, corrente na rede e corrente de saída do inversor). O outro, denominado de modelo do lado CC, deve descrever matematicamente a relação entre o ângulo de defasagem θ e a tensão do barramento CC.

3.2.1 Modelo do lado CA

As seguintes hipóteses são inicialmente assumidas para obter o modelo médio dinâmico do lado CA do sistema em análise:

1. a tensão do barramento CC é constante e igual ao seu valor nominal V_{cc} ;
2. os semicondutores são considerados elementos ideais;
3. as cargas conectadas ao PAC são desprezadas, podendo ser consideradas como distúrbios no sistema;
4. como a frequência de comutação é muito maior que a frequência fundamental, as ondulações e, portanto, os harmônicos em alta frequência gerados pelas comutações dos interruptores, são desprezados.

Considerando essas hipóteses, o circuito equivalente mostrado na Figura 15 pode ser utilizado para obter o modelo médio dinâmico do lado CA.

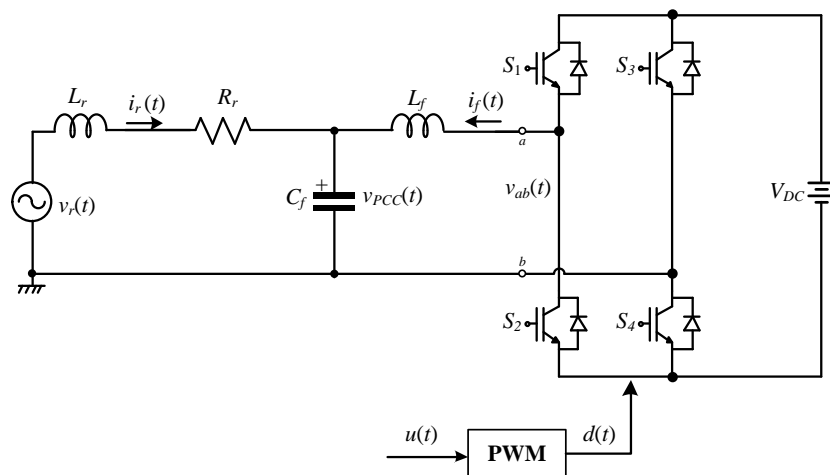


Figura 15 - Circuito equivalente para obter o modelo médio dinâmico do lado CA

Para obter o modelo médio dinâmico do lado CA, pode-se dividir esse circuito em três partes: modulador por largura de pulso, inversor em ponte completa e o circuito composto pelo filtro passa-baixas e a rede.

3.2.1.1 Modelo dinâmico do modulador por largura de pulso

O inversor em ponte completa mostrado na Figura 15 é modulado por largura de pulso, usando a estratégia PWM unipolar [36], como mostrado na Figura 16.

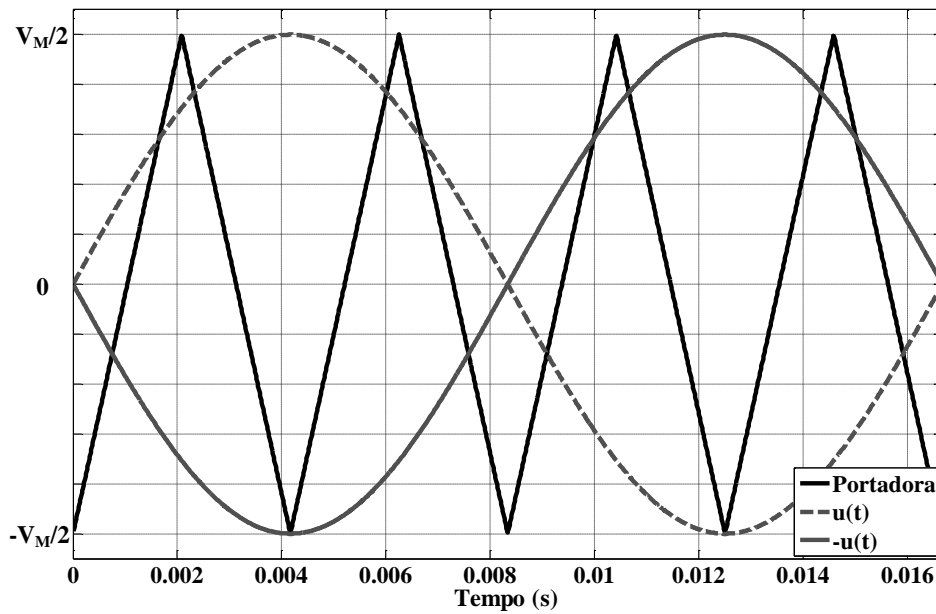


Figura 16 - Modulação por largura de pulso unipolar

Nessa estratégia de modulação, o braço A do inversor compara o sinal de controle $u(t)$ com a portadora triangular para gerar os pulsos de comando para os interruptores S_1 e S_2 a partir da seguinte lógica:

$$\begin{aligned} u(t) > v_{tri}(t) &\rightarrow S_1 = on, S_2 = off \\ u(t) < v_{tri}(t) &\rightarrow S_1 = off, S_2 = on \end{aligned} \quad (21)$$

De forma similar, o braço B do inversor compara o sinal $-u(t)$ com a portadora triangular para gerar os pulsos de comando para os interruptores S_3 e S_4 :

$$\begin{aligned} -u(t) > v_{tri}(t) &\rightarrow S_3 = on, S_4 = off \\ -u(t) < v_{tri}(t) &\rightarrow S_3 = off, S_4 = on \end{aligned} \quad (22)$$

Como resultado dessa estratégia de modulação, a tensão de saída do inversor pode assumir três níveis distintos de tensão: V_{CC} , zero e $-V_{CC}$ [36].

Considerando que o inversor opera na região linear, ou seja, $-V_M/2 \leq u(t) \leq V_M/2$, onde V_M é o valor pico-a-pico da portadora triangular, então a relação entre a razão cíclica $d(t)$ do interruptor S_1 (braço A) e o sinal de controle $u(t)$ é dada por:

$$d(t) = 0,5 + \frac{1}{V_M} u(t) \quad (23)$$

Desprezando a parte CC, o modelo dinâmico do PWM pode ser expresso por (24).

$$d(t) = \frac{1}{V_M} u(t) \quad (24)$$

3.2.1.2 Modelo dinâmico do inversor em ponte completa

O valor médio da tensão de saída do inversor em ponte completa $v_{ab}(t)$ em um período de comutação depende dos valores médios das tensões dos braços, dados por:

$$\begin{aligned} v_a(t) &= d(t)V_{CC} \\ v_b(t) &= [1 - d(t)]V_{CC} \end{aligned} \quad (25)$$

Logo, o valor médio da tensão de saída do inversor em ponte completa em um período de comutação é dado por:

$$v_{ab}(t) = v_a(t) - v_b(t) \quad (26)$$

$$v_{ab}(t) = [(2d(t) - 1)]V_{CC} \quad (27)$$

Novamente desprezando a parte CC, o modelo médio dinâmico que descreve como uma variação na razão cíclica afeta a tensão de saída do inversor em ponte completa é dado por:

$$\frac{v_{ab}(t)}{d(t)} = 2V_{CC} \quad (28)$$

3.2.1.3 Modelo dinâmico do circuito formado pelo filtro e pela rede

Uma vez que a tensão de saída do inversor $v_{ab}(t)$ é controlada pela razão cíclica $d(t)$, pode-se representar o inversor em ponte completa por uma fonte de tensão controlada, como mostrado na Figura 17, para finalizar a modelagem dinâmica do lado CA.

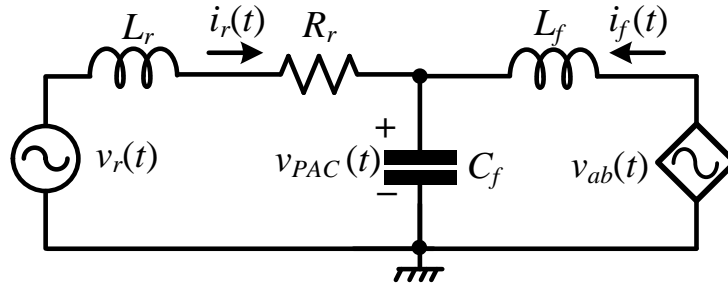


Figura 17 - Circuito equivalente composto pelo filtro passa-baixas e pela rede

O modelo médio dinâmico do sistema apresentado na Figura 17 pode ser representado em espaço de estados e é dado por:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}v_{ab}(t) + \mathbf{B}_w w(t) \quad (29)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (30)$$

onde $\mathbf{x}(t) = [i_f(t) \quad i_r(t) \quad v_{PAC}(t)]^T$ é o vetor de estados, $v_{ab}(t)$ é a entrada da planta, $w(t) = v_r(t)$ é um distúrbio, $y(t) = v_{PAC}(t)$ é a saída e as matrizes da equação de estados são:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\frac{1}{L_r} \\ \frac{1}{C_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_r} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 1] .$$

Ainda, substituindo (24) e (28) em (29) obtém-se o modelo médio dinâmico do lado CA, considerando o sinal de controle $u(t)$ como entrada da planta:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}_u u(t) + \mathbf{B}_w w(t) \quad (31)$$

onde:

$$\mathbf{B}_u = \begin{bmatrix} \frac{2V_{CC}}{V_M L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Após obter o modelo médio dinâmico do lado CA em espaço de estados, descrito por (30) e (31) foram realizadas simulações do circuito apresentado na Figura 15 e do modelo para validação do mesmo. Os principais parâmetros do sistema mostrado na Figura 15 são dados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros do sistema

Parâmetros	Valor
Tensão nominal da rede (V_r)	220 V _{RMS} / 60 Hz
Potência nominal	1 kVA
Tensão nominal do barramento CC (V_{CC})	420 V
Frequência de comutação (f_s)	19,98 kHz
Indutância da rede (L_r)	18 mH (0,14 pu)
Resistência da rede (R_r)	6 Ω (0,14 pu)
Indutância de filtro (L_f)	1 mH
Capacitância de filtro (C_f)	6 μ F

A indutância e a capacitância de filtro foram projetados para resultar em uma frequência de corte de 2 kHz e uma ondulação de corrente máxima no indutor de 40% do valor de pico da corrente nominal, sendo que o projeto detalhado do filtro é apresentado no

Apêndice A. A frequência de comutação é de 19,98 kHz, estando no limite superior da faixa de frequência audível. Já a tensão do barramento foi escolhida para gerar um índice de modulação de 0,75 e assim garantindo que o inversor opere na região linear mesmo durante degraus de carga que ocasionem afundamentos de tensão no barramento CC. Com essa tensão também é possível utilizar semicondutores de 600 V. Além disso, os valores empregados para a impedância da rede resultam em uma impedância de 0,2 pu e uma relação R_r/X_r aproximadamente unitária, que é uma relação comum em redes de distribuição de baixa tensão.

Na Figura 18 é apresentada uma comparação das formas de onda da tensão no PAC obtidas a partir da simulação do circuito da Figura 15 e do modelo descrito por (30) e (31). Desconsiderando a parcela relativa à tensão da rede e provocando uma perturbação na razão cíclica de 2% é possível observar o comportamento do modelo em um transitório e, além disso, cabe ressaltar que o modelo dinâmico obtido nessa seção representa o sistema físico de forma apropriada.

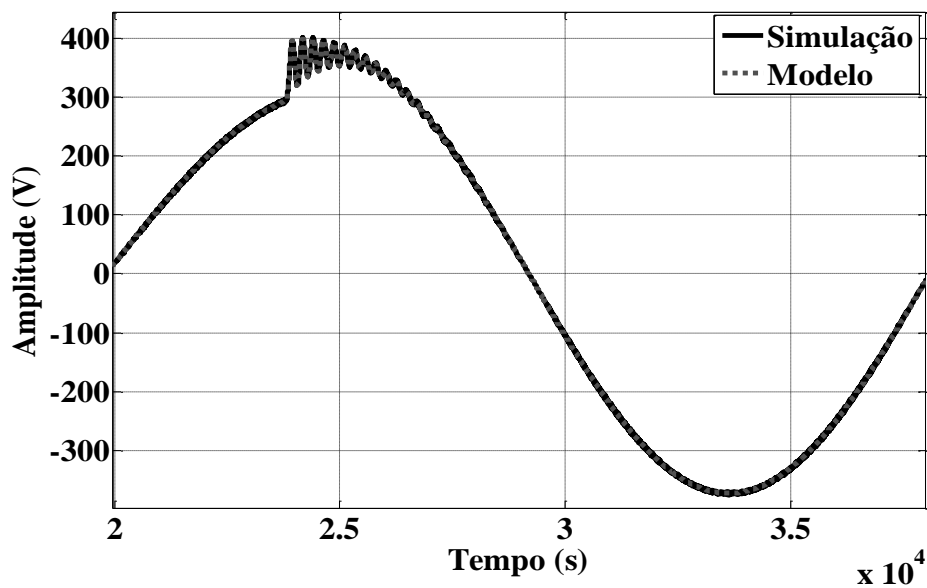


Figura 18 - Validação do modelo do lado CA

3.2.1.4 Discretização do modelo do lado CA

Uma vez que a implementação do sistema de controle será realizada em um processador digital de sinais (DSP – *Digital Signal Processor*) com período de amostragem T_s , é desejável projetar os controladores diretamente no domínio de tempo discreto.

O modelo em espaço de estados em tempo discreto pode ser obtido por [34]:

$$\mathbf{x}(k + 1) = \mathbf{G}\mathbf{x}(k) + \mathbf{H}_u u(k) + \mathbf{H}_w w(k) \quad (32)$$

$$y(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \quad (33)$$

onde as matrizes das equações de estados em tempo discreto são dadas por:

$$\mathbf{G} = e^{\mathbf{A}T_s}, \quad \mathbf{H}_u = \int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}(T_s-\tau)} \mathbf{B}_u d\tau, \quad \mathbf{H}_w = \int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}(T_s-\tau)} \mathbf{B}_w d\tau.$$

Incluindo o atraso de um período de amostragem para atualização da lei de controle na implementação digital, (32) e (33) podem ser reescritas como:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k + 1) \\ u_d(k + 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{H}_u \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ u_d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ 1 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{H}_w \\ 0 \end{bmatrix} u(k) \quad (34)$$

$$y(k) = [\mathbf{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ u_d(k) \end{bmatrix} \quad (35)$$

onde u_d é uma variável de estado adicional incluída para representar o atraso de um período de amostragem na atualização da lei de controle.

A Figura 19 mostra a resposta em frequência do modelo contínuo, dado por (30) e (31), e do modelo discreto, dado por (34) e (35), considerando o sinal de entrada u e usando os parâmetros apresentados na Tabela 3. Pode-se claramente observar que o modelo discreto introduz um significativo atraso de fase em altas frequências.

3.2.2 Modelo da tensão do barramento CC

Como destacado anteriormente, para possibilitar o projeto do compensador da malha de tensão CC, deve-se também obter um modelo dinâmico que descreva como o ângulo de defasagem θ afeta a tensão do barramento CC. Como a tensão CC é dependente da transferência de potência ativa entre os capacitores do barramento CC e a rede de distribuição [36], uma análise do fluxo de potência entre o regulador de tensão e a rede de distribuição é realizada para obter esse modelo dinâmico.

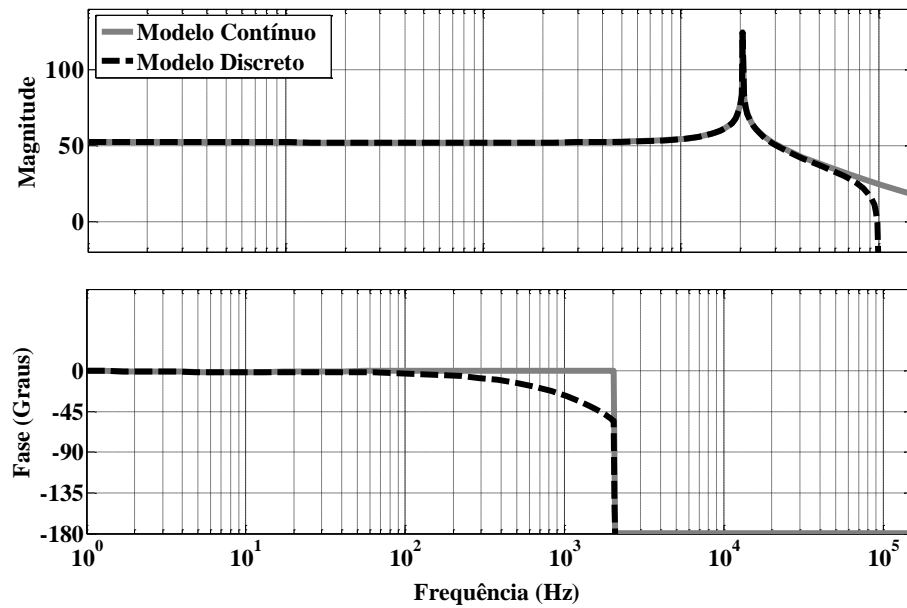


Figura 19 - Comparação das respostas em frequências dos modelos do lado CA no tempo contínuo e no tempo discreto

As seguintes hipóteses são também assumidas para obter o modelo médio dinâmico do lado CC do sistema de regulação:

1. as cargas conectadas ao PAC são desprezadas, podendo ser consideradas como distúrbios no sistema;
2. a impedância da linha é considerada puramente indutiva.

Considerando essas hipóteses, o circuito equivalente mostrado na Figura 20 pode ser utilizado para obter o modelo médio dinâmico do lado CC.

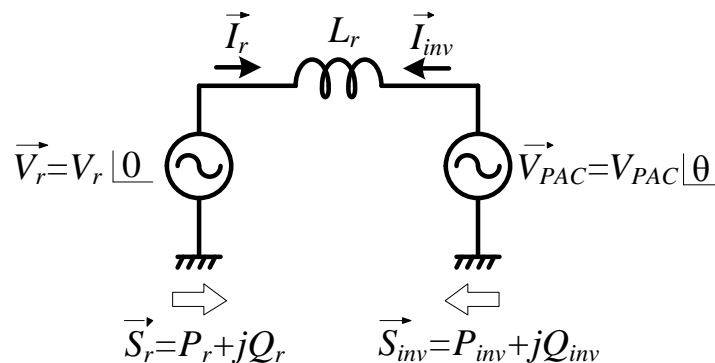


Figura 20 - Fluxo de potência do sistema a vazio

A potência aparente fornecida pela rede S_r é dada por:

$$\vec{S}_r = \vec{V}_r (\vec{I}_r)^* \quad (36)$$

onde:

$$\vec{I}_r = \frac{\vec{V}_r - \vec{V}_{PAC}}{j\omega L_r} \quad (37)$$

sendo ω a frequência angular fundamental da tensão da rede.

Substituindo (37) em(36), tem-se:

$$\vec{S}_r = \vec{V}_r \left(\frac{\vec{V}_r - \vec{V}_{PAC}}{j\omega L_r} \right)^* = \vec{V}_r \left(\frac{\vec{V}_r^* - \vec{V}_{PAC}^*}{j\omega L_r^*} \right) \quad (38)$$

As tensões da rede e do D-STATCOM podem ser expressas na forma retangular, ou seja:

$$\vec{V}_r = V_r \cos(0) + jV_r \sen(0) = V_r \quad (39)$$

$$\vec{V}_{PAC} = V_{PAC} \cos(\theta) + jV_{PAC} \sen(\theta) \quad (40)$$

$$\vec{V}_r^* = V_r \cos(0) - jV_r \sen(0) = V_r \quad (41)$$

$$\vec{V}_{PAC}^* = V_{PAC} \cos(\theta) - jV_{PAC} \sen(\theta) \quad (42)$$

Logo, substituindo (39) e (42) em (38), obtêm-se:

$$\vec{S}_r = -\frac{V_r V_{PAC} \sen(\theta)}{\omega L_r} + j \frac{V_r^2 - V_r V_{PAC} \cos(\theta)}{\omega L_r} \quad (43)$$

Assim, a potência ativa (parte real) e reativa (parte imaginária) da rede podem ser expressas por:

$$\vec{P}_r = -\frac{V_r V_{PAC} \text{sen}(\theta)}{\omega L_r} \quad (44)$$

$$\vec{Q}_r = \frac{V_r^2 - V_r V_{PAC} \cos(\theta)}{\omega L_r} \quad (45)$$

Considerando que $V_r \cong V_{PAC}$ é possível simplificar (44) e (45):

$$\vec{P}_r = -\frac{V_r^2 \text{sen}(\theta)}{\omega L_r} \quad (46)$$

$$\vec{Q}_r = \frac{V_r^2 [1 - \cos(\theta)]}{\omega L_r} \quad (47)$$

A partir de (46) obteve-se o gráfico de $P_r \times \theta$, ilustrado na Figura 21, que indica a variação do sentido e da amplitude do fluxo de potência ativa em função da variação do ângulo θ da tensão V_{PAC} . Em azul determina-se como região de transferência estável de potência, logo, a região em vermelho representa instabilidade na transferência de potência, está região de instabilidade é atingida quando $\text{sen}(\theta)$ é igual a ± 1 [38].

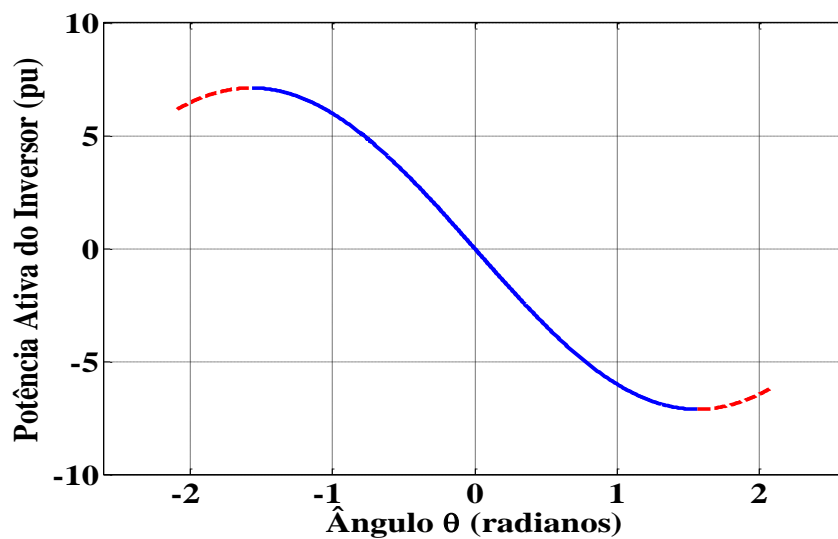


Figura 21 - Transferência de potência ativa entre a rede e o inversor com a variação do ângulo θ

A relação entre P_r e θ não é linear, contudo para valores baixos de θ (-30° até 30°) pode-se linearizar esta relação sem resultar em erros significativos (curva verde), como demonstrado na Figura 22.

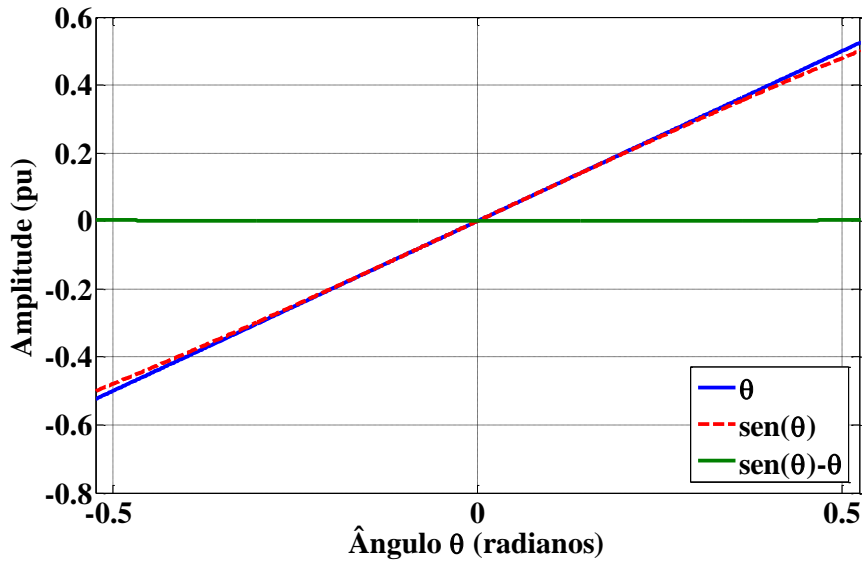


Figura 22 - Linearização de $\text{sen}(\theta)$ para valores reduzidos de θ

Logo, considerando que $\text{sen}(\theta) \cong \theta$, tem-se que:

$$p_r \cong -\frac{V_r^2}{\omega L_r} \theta \quad (48)$$

Perturbando, linearizando e aplicando a Transformada de Laplace em (48), obtém-se a função de transferência que relaciona a potência ativa fornecida pela rede com o ângulo θ (ângulo da tensão no PAC):

$$\frac{\hat{p}_r(s)}{\hat{\theta}(s)} = -\frac{V_r^2}{\omega L_r} \quad (49)$$

Por outro lado, a energia armazenada no banco de capacitores C_{CC} , que implementa o barramento CC do inversor PWM, é dada por:

$$E_C = \frac{1}{2} V_{CC}^2 C_{cc} \quad (50)$$

Esta energia também pode ser calculada a partir da potência ativa fornecida pelo inversor p_{inv} :

$$E_C = - \int p_{inv} dt \quad (51)$$

Igualando (50) e (51), e incluindo pequenas perturbações em torno dos valores nominais de p_{inv} e V_{CC} tem-se que:

$$\frac{1}{2} C_{cc} (V_{CC} + \hat{v}_{CC}(t))^2 = - \int (p_{inv} + \hat{p}_{inv}(t)) dt \quad (52)$$

Desprezando os termos CC e de segunda ordem (uma vez que as amplitudes das perturbações são pequenas), e aplicando a Transformada de Laplace, obtém-se o modelo de pequenos sinais que relaciona a tensão no barramento CC com a potência do inversor PWM:

$$\frac{\hat{v}_{CC}(s)}{\hat{p}_{inv}(s)} = - \frac{1}{s C_{cc} V_{CC}} \quad (53)$$

Da Figura 20 observa-se que, para o sistema operando a vazio, toda a potência ativa fornecida pela rede é absorvida pelo D-STATCOM para compensar as perdas no inversor e, dessa forma, manter a tensão do barramento CC regulada, ou seja:

$$p_r = -p_{inv} \quad (54)$$

Então, usando (49), (53) e (54), encontra-se a função de transferência que relaciona a tensão do barramento CC com o ângulo θ :

$$G_{cc}(s) = \frac{\hat{v}_{CC}(s)}{\hat{\theta}(s)} = -\frac{V_r^2}{\omega L_r C_{cc} V_{CC} s} \quad (55)$$

O modelo do lado CC pode ser validado através da análise da resposta a um degrau no ângulo θ . Conforme se pode observar na Figura 23, o modelo dado por (55) representa adequadamente o sistema. Para obter esta representação, após o sistema em malha fechada entrar em regime permanente, operou-se o sistema em malha aberta com um ângulo θ imposto, desta forma mostrando a característica integradora da planta frente à mudança ocorrida em θ .

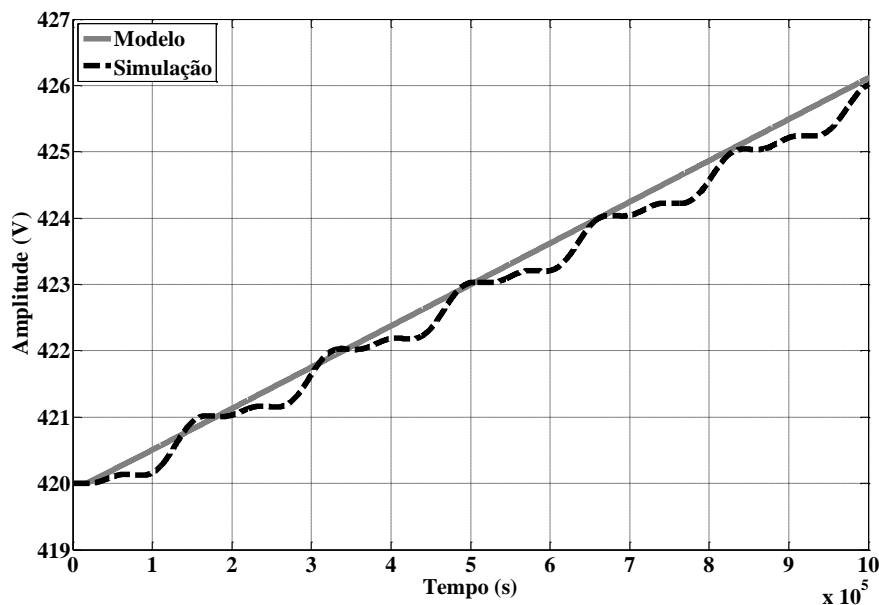


Figura 23 - Validação do modelo do lado CC

3.2.2.1 Modelo Discreto da Tensão no Barramento CC

Utilizando o software MATLAB[®], é possível discretizar a planta contínua através do método de *Tustin*, obtendo-se o modelo discreto do lado CC. Utilizou-se este método por ter a vantagem de transformar o semiplano esquerdo em s , no círculo unitário em z [39]. A Figura 24 apresenta as respostas em frequência dos modelos contínuo e discreto, onde observa-se boa concordância na faixa de frequências de interesse (baixa frequência).

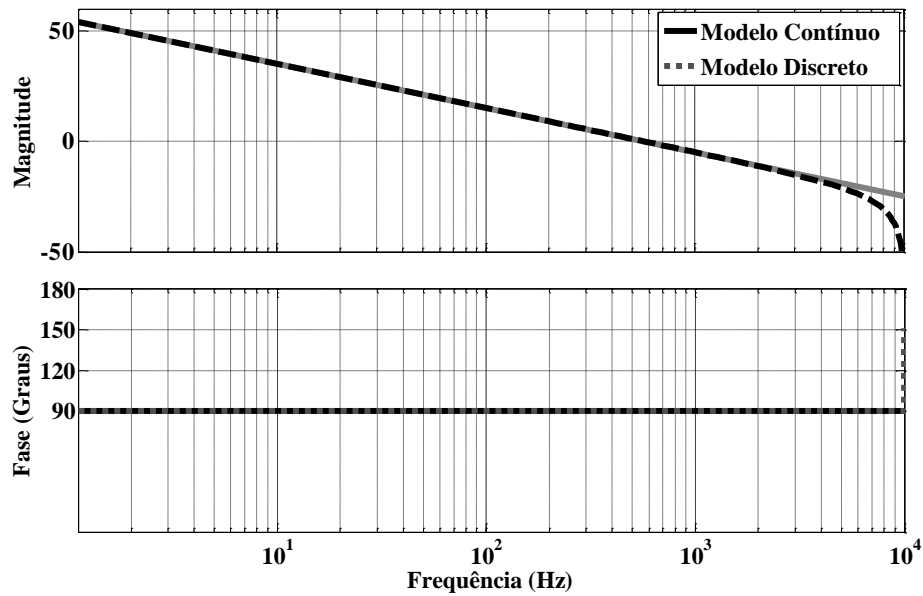


Figura 24 - Comparação das respostas em frequências dos modelos do lado CC no tempo contínuo e no tempo discreto

3.3 Projeto dos controladores

Uma vez obtidos os modelos dinâmicos que descrevem matematicamente o comportamento do sistema de regulação, pode-se realizar o projeto dos compensadores do sistema de controle digital proposto. A Figura 25 mostra novamente o sistema de controle digital proposto, agora com o D-STATCOM e a rede de distribuição substituídos pelos modelos dinâmicos obtidos na seção anterior.

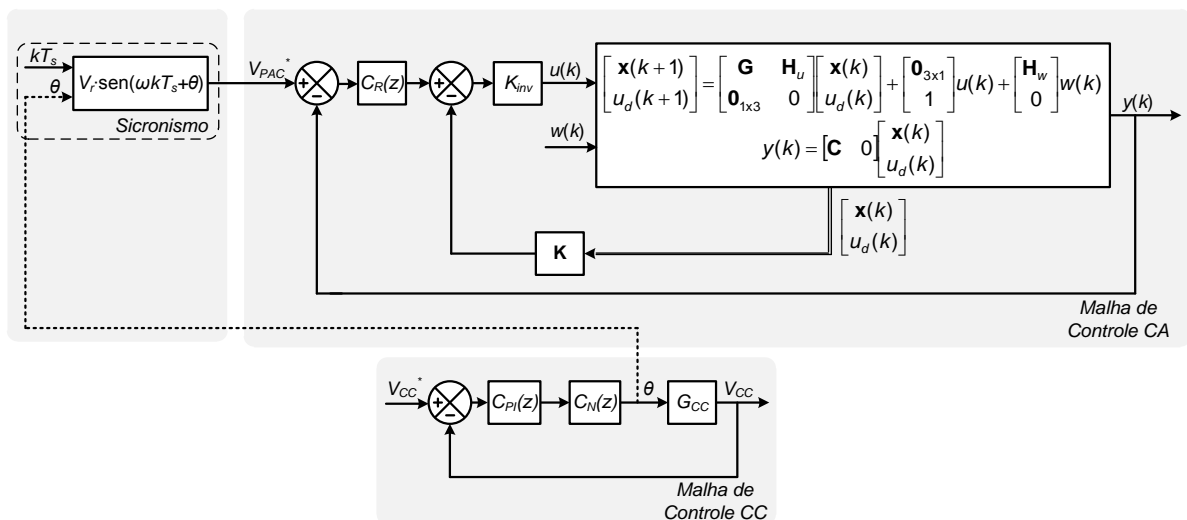


Figura 25 - Sistema de controle digital proposto

Conforme mencionado anteriormente, o sistema de controle do inversor PWM tem três funções básicas:

- Amortecimento ativo da ressonância do filtro LCL, formado pelo filtro passa-baixas de saída do inversor PWM e pela impedância da rede;
- Controle da sua tensão de saída (tensão do PAC);
- Regulação da tensão do barramento CC.

Nesse sentido, todas as malhas de controle que compõem o sistema são detalhadas e projetadas a seguir.

3.3.1 Malha de amortecimento ativo

Devido às comutações dos semicondutores, conversores estáticos conectados a rede produzem harmônicos de corrente, sendo usualmente necessário utilizar filtros passivos para atenuar estes harmônicos. Neste caso, um filtro *LC* passa-baixas é utilizado, que juntamente com a impedância da rede, resulta em um filtro *LCL*.

Filtros *LCL* resultam em uma significativa atenuação dos harmônicos de corrente, mas provocam ressonâncias indesejadas no sistema. Desta forma, antes de iniciar o projeto da malha de controle da tensão do PAC, é necessário eliminar o pico de ressonância provocado pelo filtro *LCL* [33][35].

Existem basicamente duas técnicas para amortecer essa ressonância: o amortecimento passivo e o amortecimento ativo [40][41]. O amortecimento passivo utiliza resistores em série e/ou paralelo com os elementos do filtro, contudo, esta técnica tem a grande desvantagem de acrescentar perdas ao sistema. Por outro lado, técnicas de amortecimento ativo incluem modificações no sistema de controle para amortecer a ressonância do filtro *LCL*, evitando a inclusão de perdas adicionais. Entretanto, ocorre um aumento da complexidade do sistema de controle.

Dentre diversas técnicas de amortecimento ativo existentes na literatura, esta Dissertação de Mestrado emprega a técnica baseada em retroação total de estados, em que os polos do sistema em malha fechada são alocados em posições definidas para amortecer a ressonância do filtro *LCL*.

No intuito de descrever a técnica de amortecimento ativo baseada em retroação total de estados, o modelo médio dinâmico do lado CA em tempo discreto, descrito por (34) e (35),

é representado através de diagramas de blocos na Figura 26, desprezando o sinal de distúrbio, ou seja, $w(k) = 0$.

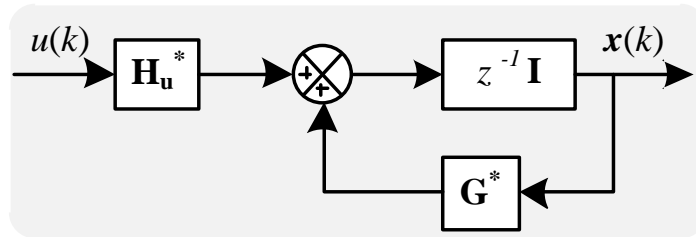


Figura 26 - Modelo dinâmico do lado CA em espaço de estados

Considerando que o sinal de controle é obtido a partir de uma retroação dos estados, através de uma matriz de ganhos \mathbf{K} de dimensão 1×4 , expressa por:

$$u(k) = -\mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ u_d(k) \end{bmatrix} \quad (56)$$

Então, o sistema em malha fechada pode ser representado como mostra a Figura 27. Com esse sinal de controle, a equação dinâmica (34) torna-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ u_d(k+1) \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{H}_u \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{K} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ u_d(k) \end{bmatrix} \quad (57)$$

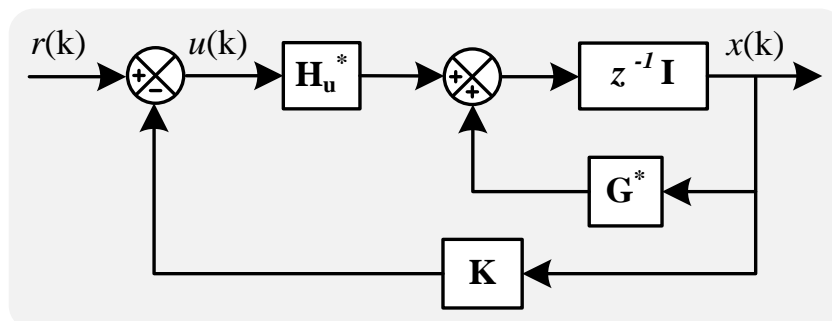


Figura 27 - Planta do lado CA com retroação total de estados para amortecimento ativo

Sabe-se que os polos de um sistema são os autovalores da matriz dinâmica. Então, para o sistema em malha fechada apresentado na Figura 27 são os polos da matriz

$\begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{H}_u \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{K}$. Conseqüentemente, as posições dos polos em malha fechada e, portanto, a estabilidade e a característica da resposta temporal do sistema em malha fechada, podem ser modificadas de acordo com a matriz de ganhos \mathbf{K} .

Assumindo que todas as variáveis de estado podem ser medidas ou observadas, e que o sistema é completamente controlável, então os polos do sistema em malha fechada podem ser alocados em qualquer posição do plano z com o projeto adequado da matriz de ganhos \mathbf{K} [42]. Para o sistema de regulação em análise, ambas as condições são satisfeitas e, portanto, os polos em malha fechada podem ser idealmente alocados em qualquer posição do plano z .

A localização dos polos em malha fechada foi inicialmente definida no tempo contínuo e após os mesmos foram discretizados usando a seguinte equação [39]:

$$p_z = e^{p_s T_s} \quad (58)$$

onde p_z é a localização do polo no plano z , p_s é a localização do polo no plano s e T_s é o período de amostragem.

A Figura 28 mostra a localização dos polos e zeros do sistema em malha aberta, usando os parâmetros da Tabela 3.

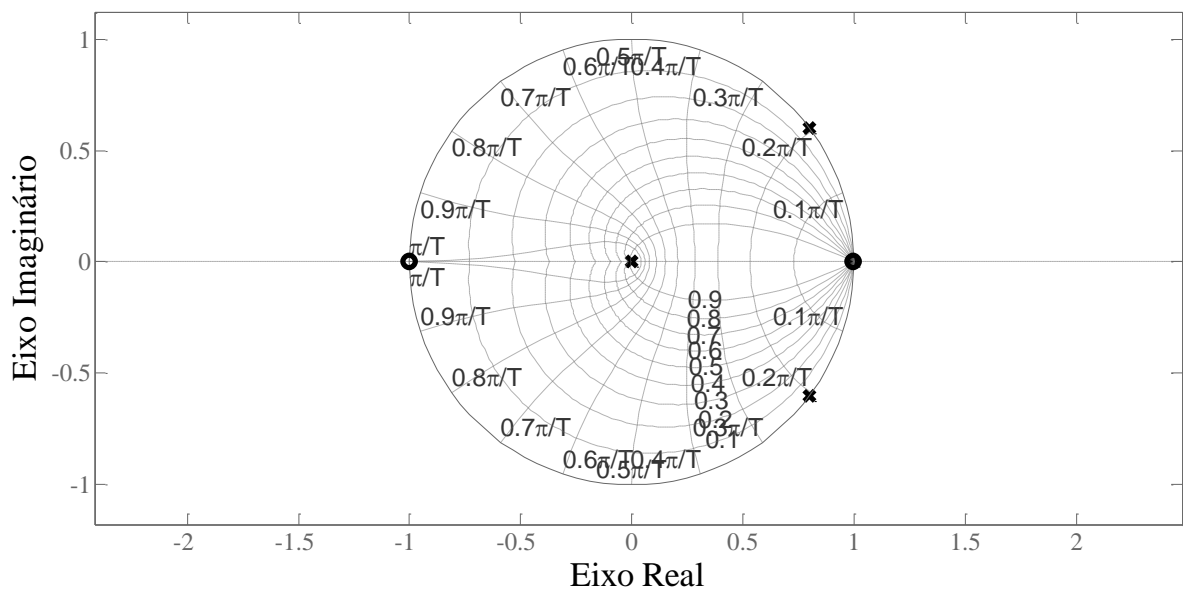


Figura 28 - Localização dos polos e zeros do sistema em malha aberta

Conforme destacado anteriormente, a retroação total de estados permite alocar os polos do sistema em malha fechada em qualquer posição do plano z . Logo, deve-se definir a localização desejada dos polos para calcular a matriz de ganhos \mathbf{K} . Nesta Dissertação, os polos complexos conjugados foram alocados com uma frequência angular de 24000 rad/s e um coeficiente de amortecimento de 0,7, sendo que os polos originais encontravam-se em 13000 rad/s e com coeficiente de amortecimento zero, com isso obtêm-se polos mais amortecidos. Um dos polos reais foi posicionado exatamente sobre um zero da planta, desta forma diminuindo a ordem do sistema. E o polo que representa o atraso de implementação, que está inicialmente na origem do plano z , foi afastado da origem até metade da frequência de comutação para reduzir a energia associada ao sinal de controle. A

Tabela 4 mostra a localização desejada dos polos em malha fechada, tanto no plano s quanto no plano z , juntamente com a posição dos polos do sistema em malha aberta.

Então, a partir das posições desejadas para os polos em malha fechada e das matrizes dinâmica e de entrada do modelo (57), obteve-se a matriz de ganhos \mathbf{K} usando a função *place* do MATLAB[®], dada por:

$$\mathbf{K} = [0,043407 \quad 0,043145 \quad -0,001382 \quad 0,922209] \quad (59)$$

Tabela 4 - Localização dos polos

Polos em malha aberta		Polos em malha fechada	
Plano s	Plano z	Plano s	Plano z
$-0,000149e^4 + 1,2905 e^4i$	$0,7984 + 0,6018i$	$-1,68e^4 + 1,7139 e^4i$	$0,2821 + 0,3262i$
$-0,000149e^4 - 1,2905 e^4i$	$0,7984 - 0,6018i$	$-1,68e^4 - 1,7139 e^4i$	$0,2821 - 0,3262i$
-55,6	0,99737	-55,6	0,99722
	0,0	$-4,3982 e^4$	0,11065

Na Figura 29 é apresentada a localização dos polos e dos zeros do sistema em malha fechada com retroação de estados mostrado na Figura 28, usando a matriz de ganhos (59), podendo-se observar que os polos do sistema em malha fechada estão nas posições desejadas.

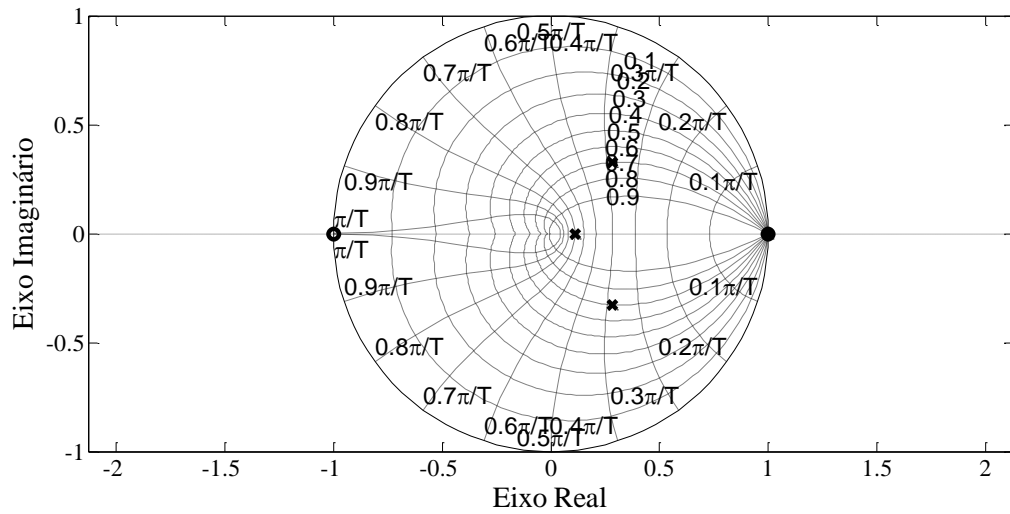


Figura 29 - Localização dos polos e zeros do sistema em malha fechada com retroação total de estados

Para demonstrar que a técnica de retroação total de estados, juntamente com a matriz de ganhos \mathbf{K} calculada, resultou no amortecimento da ressonância do filtro *LCL*, a Figura 30 mostra as respostas em frequência da planta em malha aberta e do sistema em malha fechada com retroação de estados.

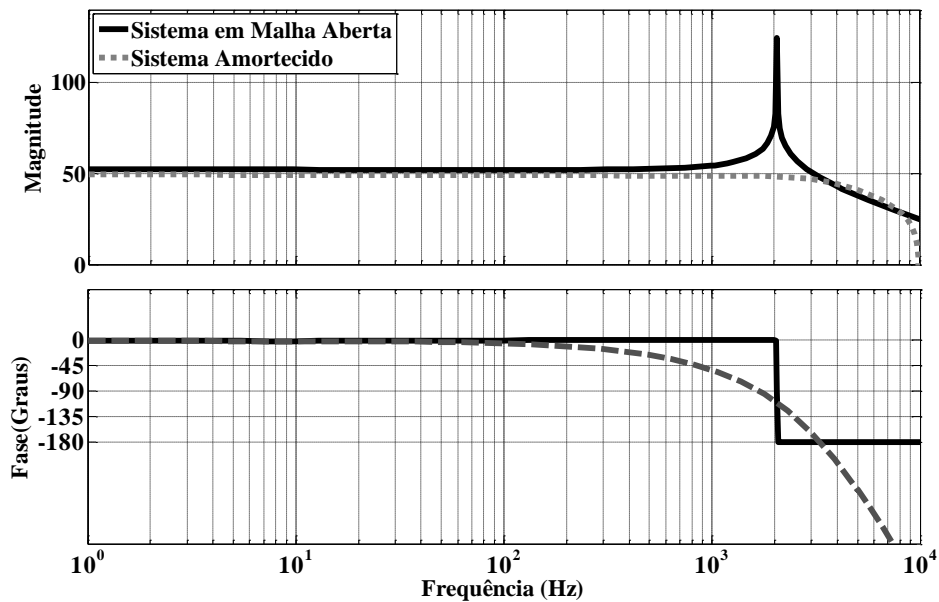


Figura 30 - Respostas em frequência do sistema em malha aberta e do sistema amortecido

3.3.2 Malha de controle da tensão do PAC

Com a retroação total de estados pôde-se alocar os polos do sistema em malha fechada e, dessa forma, amortecer a ressonância do filtro *LCL*. Contudo, ainda deve-se incluir uma malha de controle para rastrear o sinal de referência da tensão do PAC, como mostrado na Figura 31.

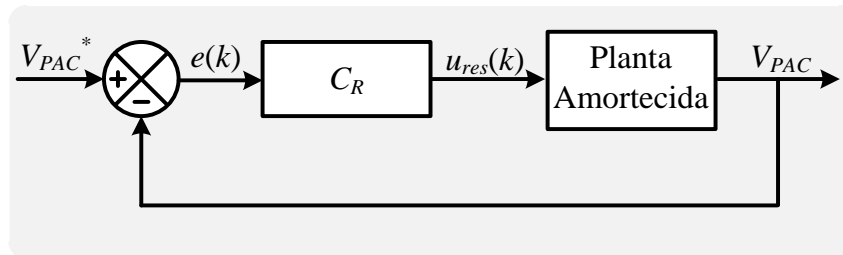


Figura 31 - Malha de controle da tensão do PAC

Como o sinal de referência V_{PAC}^* é senoidal, um compensador ressonante sintonizado na frequência fundamental da tensão do PAC pode ser empregado, assim garantido erro nulo em regime permanente e rejeição de distúrbios nessa mesma frequência [35][43][45].

$$C_R(z) = k_r \frac{(z^2 - 2e^{-\zeta\omega_n T_s} \cos(\omega_n T_s)z + e^{-2\zeta\omega_n T_s})}{(z^2 - 2z \cos(\omega_n T_s) + 1)} \quad (60)$$

Os polos do compensador ressonante devem ser posicionados sobre o eixo imaginário, exatamente na frequência do sinal de referência (ω_n), garantindo erro nulo em regime permanente. Já os zeros do compensador, os quais possuem parte real e imaginária, podem ser alocados aproximadamente uma década abaixo da frequência de cruzamento desejada (ω_{n2}) e com um coeficiente de amortecimento (ζ) entre 0,6 e 0,8, de forma a não comprometer a margem de fase do sistema.

A Figura 32 apresenta a resposta em frequência da função de transferência de malha aberta com a inclusão do compensador ressonante, que neste caso tem os polos no eixo imaginário em 60 Hz e os zeros em 100 Hz e $\zeta = 0,7$. Pode-se observar que o compensador ressonante resulta em um ganho muito elevado na frequência do sinal de referência, idealmente garantindo erro nulo em regime permanente. Contudo, nota-se que próximo à frequência de cruzamento do ganho, o comportamento da curva de ganho aproxima-se a uma

reta, o que acaba dificultando o ajuste do ganho, bem como deixando o sistema muito sensível a variações paramétricas.

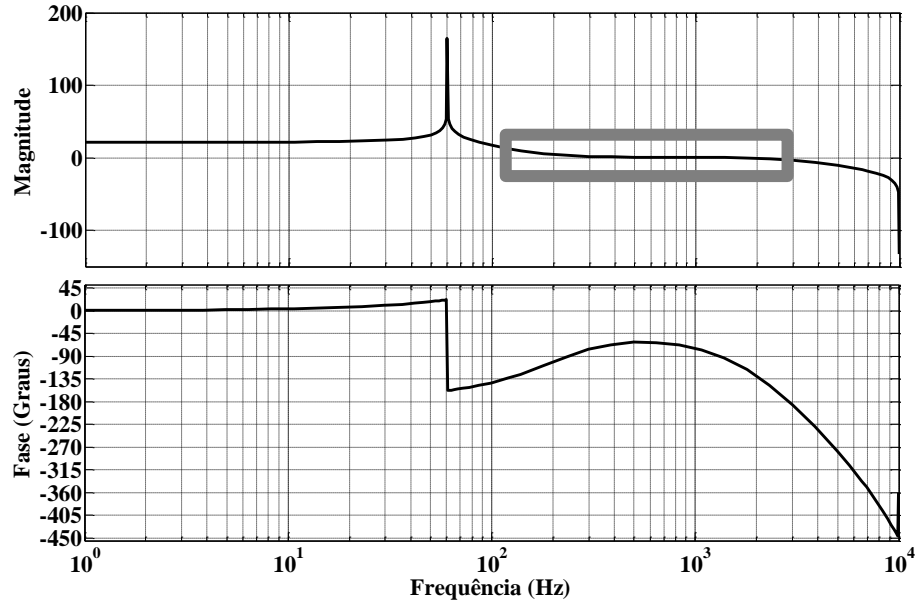


Figura 32 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta com a inclusão do compensador ressonante

Desta forma, verificou-se a necessidade de incluir uma parcela de atraso de fase, necessária para proporcionar uma inclinação de -20 dB/dec na frequência de cruzamento do ganho. O polo é posicionado antes do zero, uma década abaixo da frequência de corte desejada e o zero é posicionado na metade desta frequência. Com isso, a função de transferência do compensador torna-se:

$$C_R(z) = k_r \frac{(z^2 - 2e^{-\zeta\omega_{n2}T_s}\cos(\omega_{n2}T_s)z + e^{-2\zeta\omega_{n2}T_s})(z - e^{-\omega_z T_s})}{(z^2 - 2z\cos(\omega_n T_s) + 1)(z - e^{-\omega_p T_s})} \quad (61)$$

As especificações impostas a esta malha de controle são uma frequência de cruzamento do ganho em torno de 1 kHz e uma margem de fase em torno de 45° . Como resultado, o compensador ressonante discreto no tempo, incluindo também uma parcela de atraso de fase, foi projetado com a ferramenta *sisotool* do Matlab[®].

A Figura 33 mostra a resposta em frequência da função de transferência de malha aberta com a inclusão do compensador ressonante e da parcela de atraso de fase, atendendo as especificações impostas ao projeto do compensador.

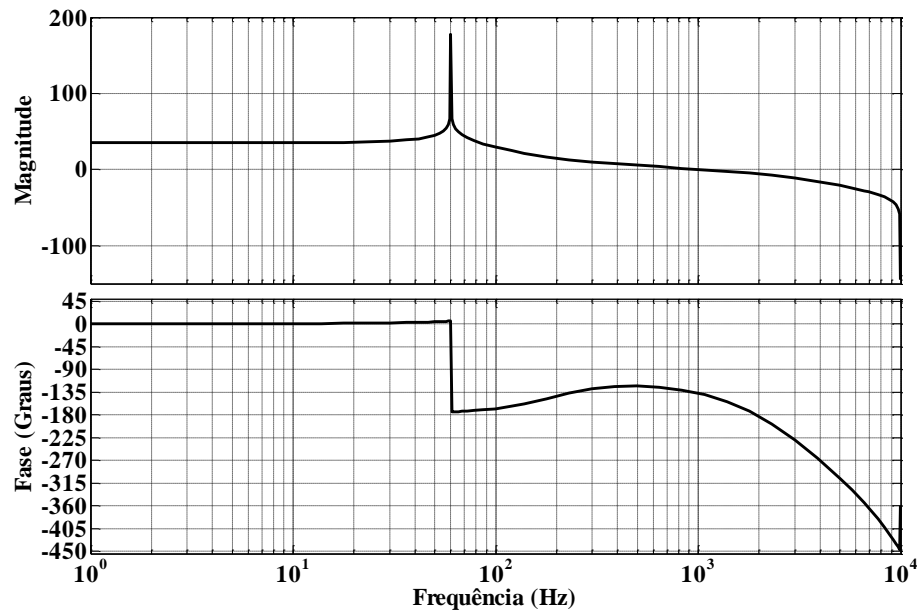


Figura 33 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta do lado CA com a inclusão do compensador ressonante e da parcela de atraso de fase

Analisando o diagrama de bode da sensibilidade de saída do controlador, Figura 34, pode-se notar que próximo a frequência de corte projetada (1 kHz) existe uma parcela acima de 0 dB, desta forma, para evitar que ruídos de medias sejam amplificados diminui-se a banda passante do controlador da malha CA.

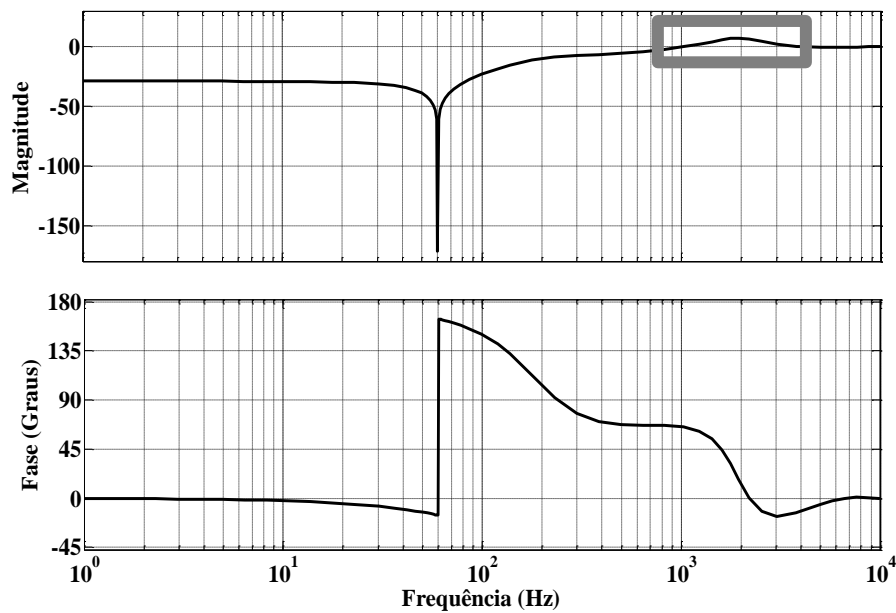


Figura 34 - Resposta em frequência do controlador para sensibilidade de saída

Desta forma, as especificações do controlador passam a ter uma margem de fase de 60° e frequência de corte de 800 Hz. A função de transferência resultante é apresentada em (62) bem como o novo diagrama de Bode apresentado na Figura 35.

$$C_R(z) = 0,0012458 \frac{(z - 0,2843)(z^2 - 1,925z + 0,9271)}{(z^2 - 2z + 1)(z - 0,9164)} \quad (62)$$

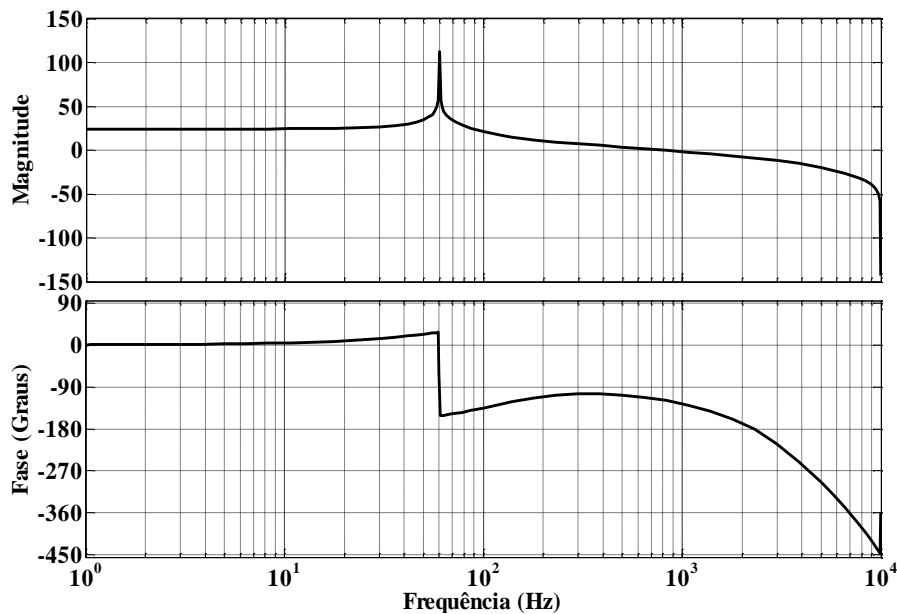


Figura 35 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta do lado CA com a inclusão do compensador ressonante e da parcela de atraso de fase implementado

3.3.3 Malha de controle da tensão do barramento CC

Esta malha de controle define o ângulo da tensão do PAC (θ) a partir da realimentação da tensão do barramento CC, definindo a quantidade de potência ativa processada pelo inversor PWM para manter regulada sua tensão CC.

A estrutura de controle proposta para essa malha é apresentada na Figura 36 consistindo de dois compensadores em cascata.

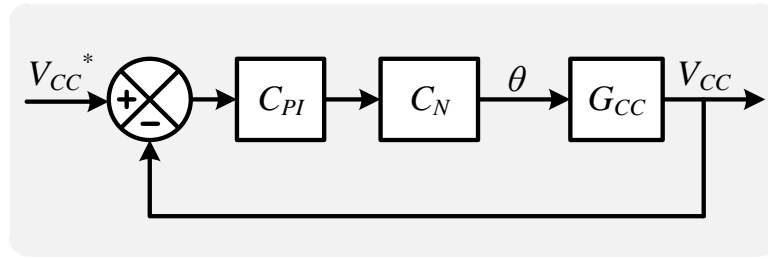


Figura 36 - Malha de controle da tensão do barramento CC

Como o sinal de referência (V_{CC}^*) é constante, um compensador proporcional-integral C_{PI} é empregado para garantir erro nulo em regime permanente:

$$C_{PI}(z) = k_{pi} \frac{(z - e^{-\omega_z T_s})}{z - 1} \quad (63)$$

Além disso, a tensão do barramento CC possui ondulações no dobro da frequência fundamental (120 Hz) devido à potência instantânea processada pelo inversor PWM. Essa ondulação de tensão causaria ondulações de mesma frequência no ângulo θ , distorcendo a tensão de referência do PAC. Então, com o intuito de eliminar essas ondulações no ângulo θ , um filtro rejeita-faixa (C_N) foi incluído em cascata com o compensador PI. Neste caso, utilizou-se um filtro rejeita-faixa (*Notch*), cuja característica é o oposto do controlador ressonante, ou seja, em uma frequência específica dada por ω_{nn} apresenta um ganho negativo [46]. A função de transferência do filtro rejeita-faixa utilizada no domínio z é da por:

$$C_N(z) = \frac{(z^2 - 2z \cos(\omega_{nn} T_s) + 1)}{(z^2 - 2e^{-\zeta \omega_{nn} T_s} \cos(\omega_{nn} T_s) + e^{-2\zeta \omega_{nn} T_s})} \quad (64)$$

Esta malha de controle deve ser lenta, se comparada com a malha CA, evitando a interação entre as malhas e reduzindo distorções na tensão de referência do PAC. Nesse sentido, o zero e o ganho do compensador PI foram projetados para resultar em uma margem de fase em torno de 60° e uma frequência de cruzamento do ganho de 3 Hz, resultando no seguinte compensador:

$$C_{PI}(z)C_N(z) = -0,0041096 \frac{(z + 0,9993)(z^2 - 1,999z + 1)}{(z - 1)(z^2 - 1,992z + 0,9937)} \quad (65)$$

Na Figura 37 é mostrada a resposta em frequência da função de transferência em malha aberta do lado CC, incluindo o compensador PI e o filtro rejeita-faixa apresentados acima.

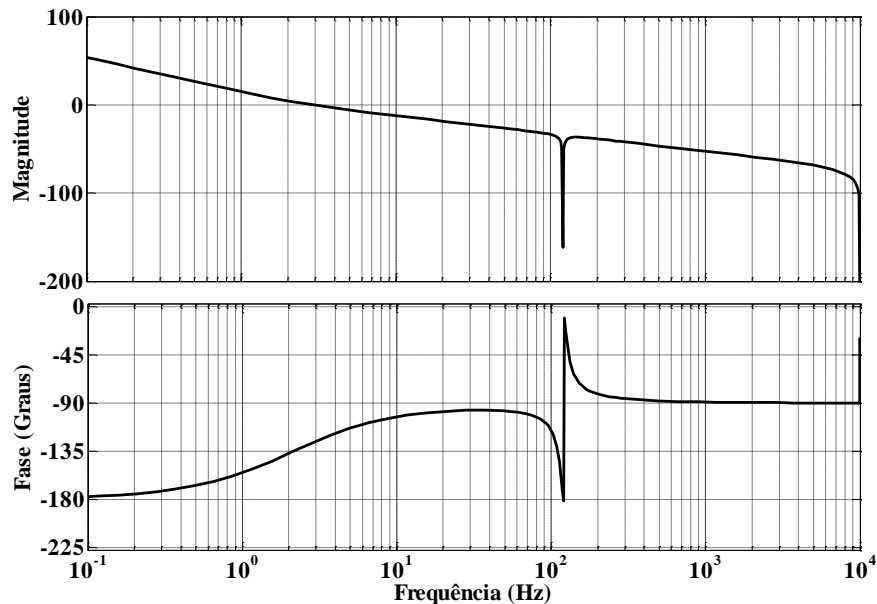


Figura 37 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta do lado CC com a inclusão do compensador PI e do filtro rejeita-faixa

3.3.4 Conexão entre as malhas de controle

As malhas de controle da tensão do barramento CC e da tensão do PAC são conectadas através de uma função senoidal para gerar um sinal de referência com a amplitude desejada para a tensão do PAC, como mostrado na Figura 38.

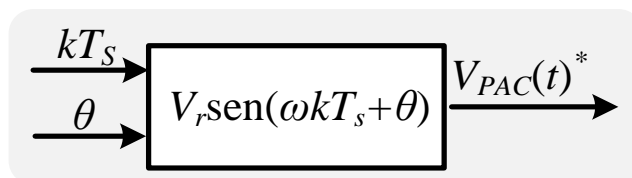


Figura 38 - Geração do sinal de referência da tensão do PAC

Os argumentos da função senoidal são o tempo discreto kT_s (em segundos) e o ângulo θ (em radianos). Como destacado anteriormente, o parâmetro θ é o ângulo de defasagem entre

as tensões da rede e do PAC, sendo gerado pela malha de controle da tensão do barramento CC.

Por outro lado, o tempo kT_s é gerado por um circuito de sincronismo. Uma vez que a medida da tensão da rede pode apresentar distorções e ruídos, optou-se por utilizar um filtro de Kallman [47], apresentado no Apêndice B, gerando um sinal senoidal sincronizado com a componente fundamental da tensão da rede. No instante que esse sinal senoidal cruzar por zero com derivada positiva, um contador é zerado e a cada instante de amostragem o mesmo é incrementado com o valor do período de amostragem. Dessa forma, gera-se um sinal dente de serra, que corresponde ao tempo discreto kT_s , como pode ser observado na Figura 39.

Esse sistema de sincronismo pode ser executado previamente à conexão do D-STATCOM na rede de distribuição, não sendo necessária a execução do circuito de sincronismo durante a operação do equipamento. Variações de fase da tensão da rede seriam compensadas pela malha de controle da tensão do barramento CC, que ajustaria automaticamente o ângulo θ . Contudo, deve-se avaliar o impacto da variação de frequência da tensão da rede, que apresenta pequenas variações em torno do valor nominal devido a variações de carga.

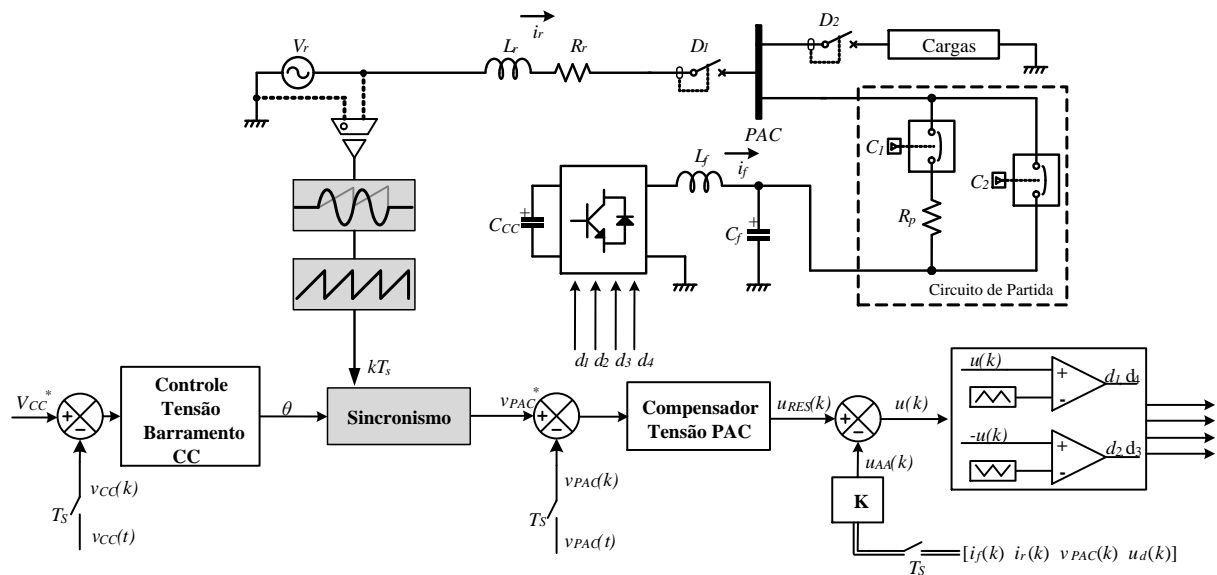


Figura 39 - Sistema de sincronismo

3.3.4.1 Análise do impacto da variação de frequência

Considere que o sinal de referência da tensão do PAC é dado por:

$$v_{PAC}^*(kT_S) = V_{PAC} \text{sen}(\omega_{SINC} kT_S + \theta) \quad (66)$$

Onde ω_{SINC} é a frequência angular da tensão da rede, determinada pelo sistema de sincronismo previamente à conexão do D-STATCOM no PAC.

Por outro lado, a tensão da rede é dada por:

$$v_R(kT_S) = V_R \text{sen}(\omega kT_S) \quad (67)$$

Onde a frequência angular ω usualmente apresenta variações em torno do seu valor nominal, devido a variações de carga no sistema de potência.

Assim, a variação de frequência $\Delta\omega$ pode ser definida como:

$$\Delta\omega = \omega - \omega_{SINC} \quad (68)$$

Substituindo (68) em (66) tem-se que:

$$v_{PAC}^*(kT_S) = V_{PAC} \text{sen}(\omega kT_S - \Delta\omega kT_S + \theta) \quad (69)$$

De outra forma:

$$v_{PAC}^*(kT_S) = V_{PAC} \text{sen}(\omega kT_S + \theta^*) \quad (70)$$

onde:

$$\theta^* = \theta - \Delta\omega kT_S \quad (71)$$

De acordo com a análise apresentada na seção 2.3.5, as tensões da rede e do PAC, dadas respectivamente por (67) e (70), devem estar defasadas de um determinado ângulo θ^* , cujo valor é constante para um dado ponto de operação, para que a potência ativa processada pelo D-STATCOM seja nula e a sua tensão do barramento CC mantenha-se constante.

Desta forma, ao ocorrer uma variação de frequência o ângulo θ produzido pela malha de controle da tensão do barramento CC compensará o segundo termo de (G), produzindo

pela variação de frequência, resultando no ângulo θ^* que mantém nula a potência ativa processada pelo D-STATCOM.

O impacto da variação de frequência no sistema pode ser analisado considerando a mesma como uma perturbação no sistema de controle da tensão do barramento CC, como mostrado na Figura 43.

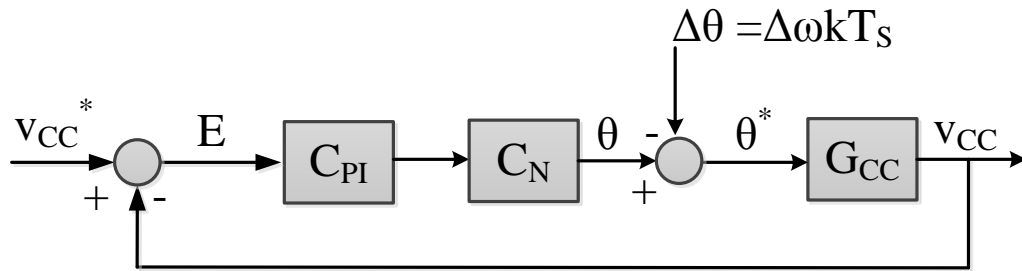


Figura 40 - Sistema de controle incluindo uma perturbação da frequência da rede

Aplicando o princípio da superposição, a tensão de saída V_{CC} produzida pela perturbação $\Delta\theta$ pode ser obtida por:

$$V_{CC}(z) = \frac{-G_{CC}}{1 + G_{CC}C_{PI}C_N} \Delta\theta(z) \quad (72)$$

Então, o erro introduzido pela perturbação $\Delta\theta$ pode ser obtido por:

$$E(z) = \frac{G_{CC}}{1 + G_{CC}C_{PI}C_N} \Delta\theta(z) \quad (73)$$

Considerando uma variação de frequência que se mantenha constante ou que varie lentamente, a perturbação $\Delta\theta$ será um sinal do tipo rampa com inclinação $\Delta\omega$, como mostrado na Figura 41. Assim, mesmo empregando um compensador PI, a perturbação $\Delta\theta$ produz um erro em regime permanente na tensão do barramento CC.

O valor do erro em regime permanente pode ser obtido através do teorema do valor final, dado por:

$$e = \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1})E(Z) \quad (74)$$

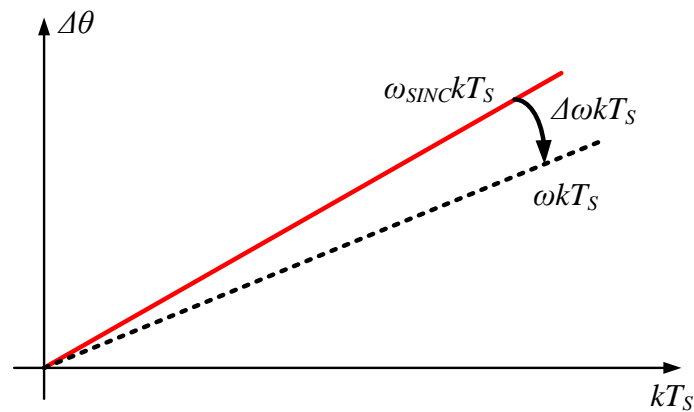


Figura 41 - Representação da variação de frequência

Substituindo (73) em (74), e considerando que $\Delta\theta$ é um sinal do tipo rampa com inclinação $\Delta\omega$, ou seja, $\Delta\theta = \Delta\omega kT_s$ tem-se que:

$$e = \lim_{z \rightarrow 1} \left[\frac{G_{CC}}{1 + G_{CC}C_{PI}C_N} \cdot \frac{\Delta\omega}{(1 - z^{-1})} \right] \quad (75)$$

3.4 Resultados de simulação

O desempenho do sistema de controle digital proposto foi inicialmente testado através de simulações, empregando os parâmetros mostrados na Tabela 3 e os compensadores projetados na seção anterior.

A Figura 42 mostra as formas de onda da tensão do PAC e do sinal de referência ao ocorrer um degrau de carga, de operação a vazio para carga resistiva nominal. Na Figura 43 é apresentado o detalhe da tensão no PAC no momento do degrau de carga, mostrando que o sistema de controle da tensão do PAC rapidamente atua para compensar a queda de tensão e restaurar a tensão para níveis adequados.

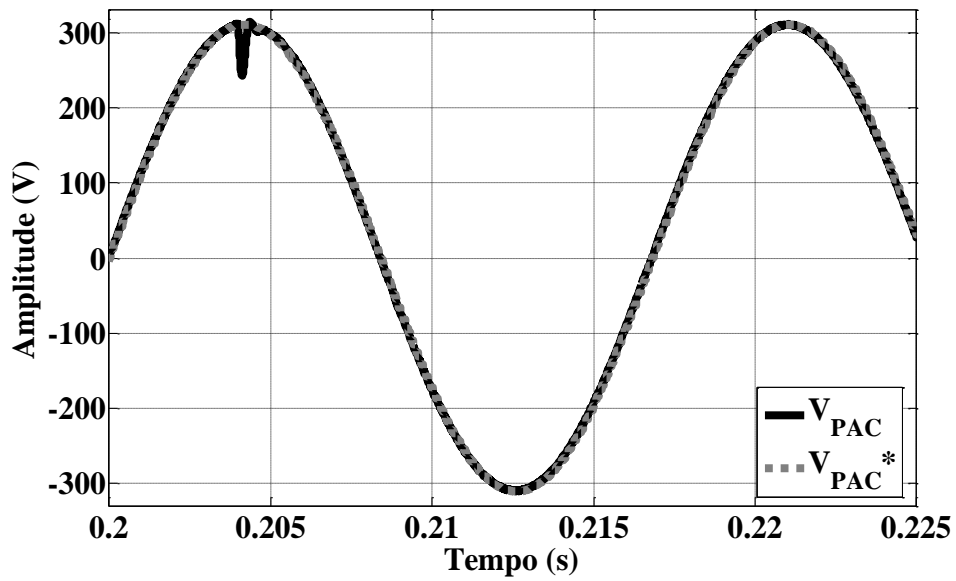


Figura 42 - Tensão no PAC e tensão no PAC de referência durante um degrau de carga

Na Figura 44 pode-se avaliar o impacto que a variação de carga tem na tensão do barramento CC. Para compensar a queda de tensão no barramento, o sistema de controle varia o ângulo θ , como mostrado na Figura 45 e restaura a tensão no banco de capacitores.

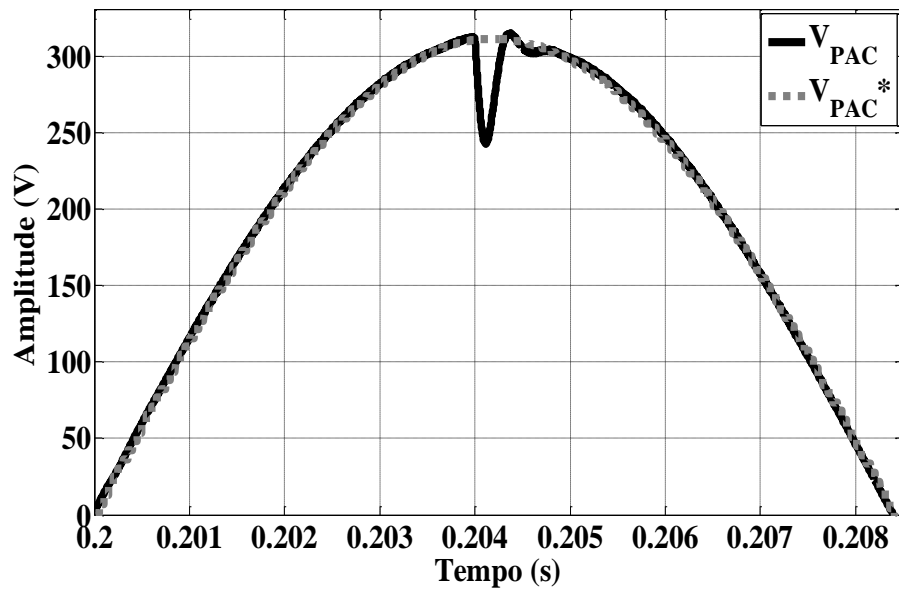


Figura 43 - Detalhe da tensão no PAC no instante do degrau de carga

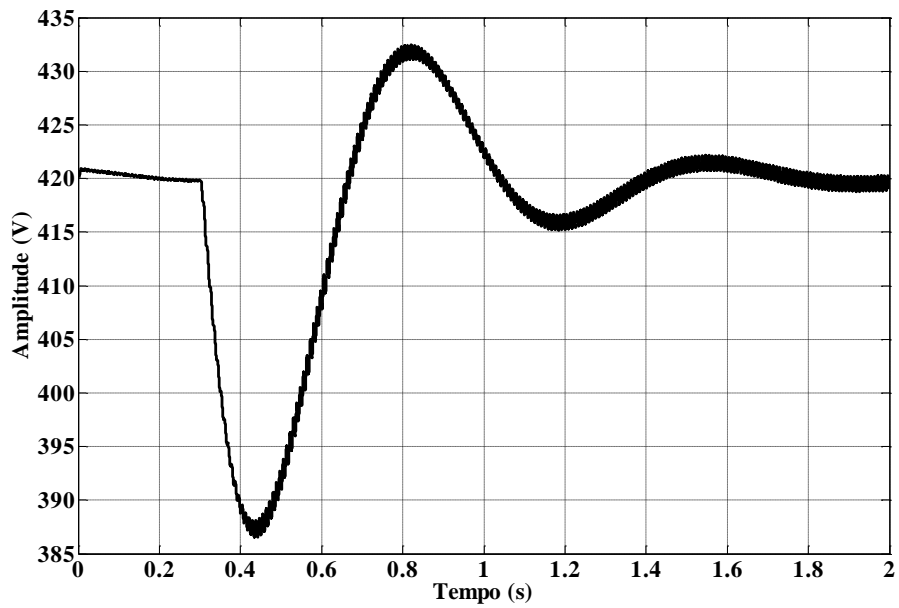


Figura 44 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga

Analisando a forma de onda da tensão no PAC e a da corrente no inversor apresentado na Figura 46, nota-se que no instante do degrau de carga, o inversor fornece potência ativa à rede, isso ocorre porque o controle do barramento CC é lento e não atualiza o ângulo θ instantaneamente. Porém, após o sistema entrar em regime permanente, Figura 47, o mesmo opera como compensador de reativos, ou seja, com a corrente em quadratura com a tensão no PAC.

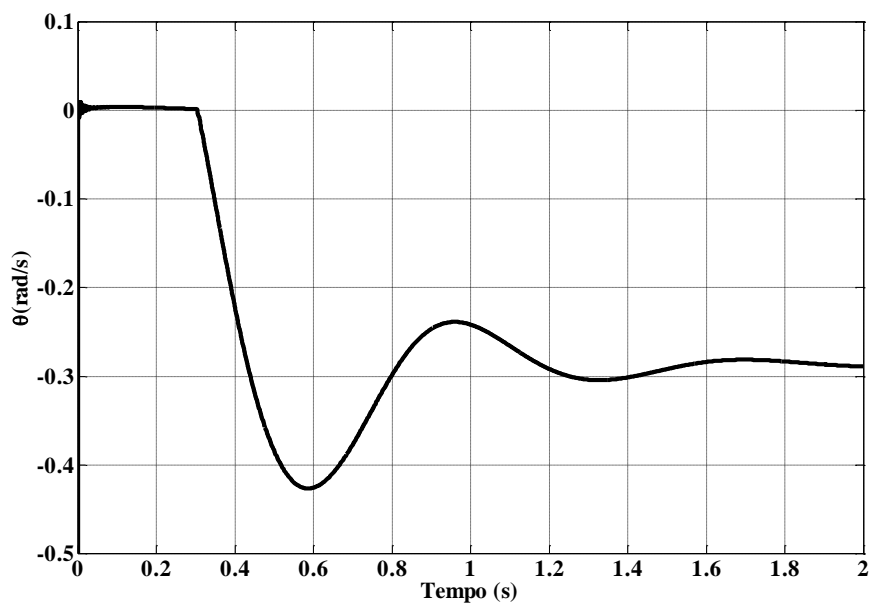


Figura 45 - Ângulo θ gerado pela malha de controle da tensão do barramento CC

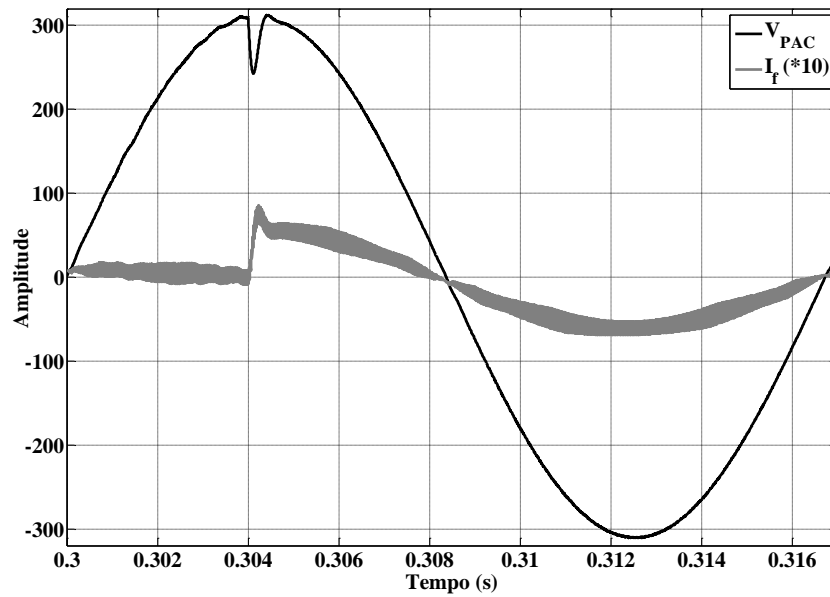


Figura 46 - Tensão no PAC e corrente do inversor durante um degrau de carga

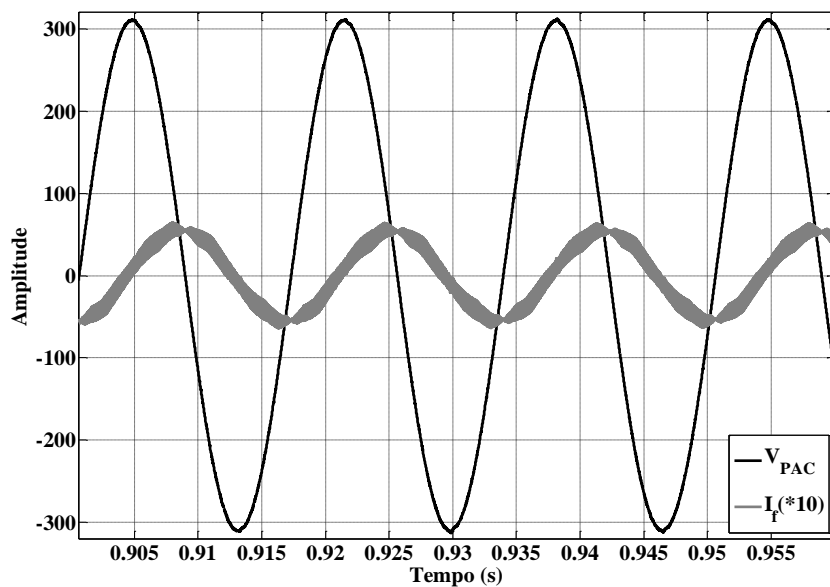


Figura 47 - Tensão no PAC e corrente do inversor durante em regime

3.4.1 Análise com variação de frequência

Para comprovar a análise desenvolvida na seção 3.3.4.1, onde é demonstrado o impacto da variação de frequência da rede no sistema de controle, uma simulação incluindo uma variação de frequência foi desenvolvida. Considerando uma variação de 0,5 Hz, ou seja, de 60 para 60,5 Hz, o ângulo θ determinado pelo sistema de controle é apresentado na Figura 48.

Conforme destacado anteriormente, pode-se notar que o mesmo não é constante, variando como uma rampa devido à variação de frequência.

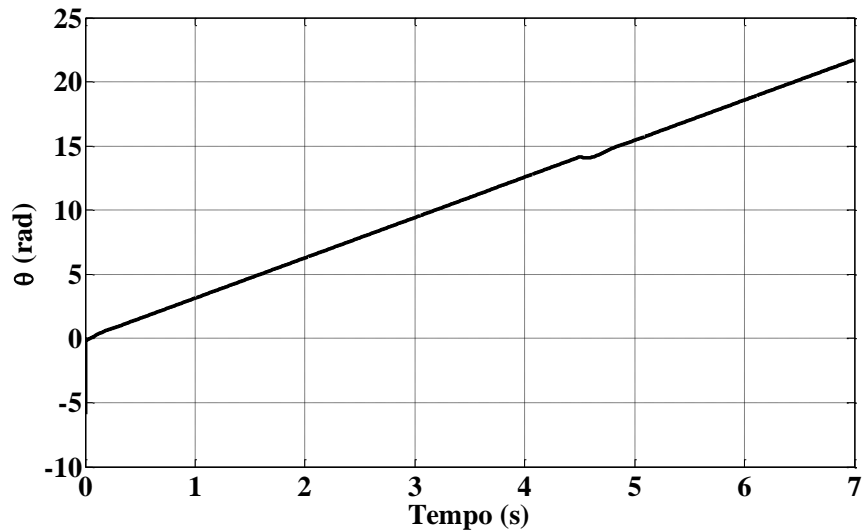


Figura 48 - Ângulo θ para uma variação de frequência

Na Figura 49 é apresentada a tensão do barramento CC e a respectiva referência, pode-se notar que a tensão é regulada, porém existe um erro CC entre as mesmas, este erro pode ser calculado através da equação apresentada em (75). Isso também ocorre na tensão do ponto de acoplamento comum, mesmo com este erro a tensão no PAC é regulada, como pode-se observar na Figura 50. Durante a partida a tensão no PAC diverge da referência, mas no segundo ciclo entra em regime.

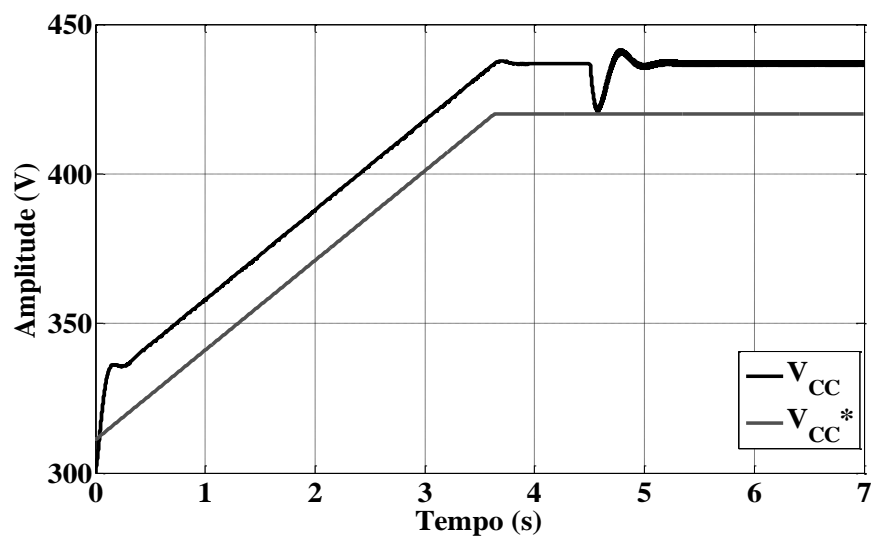


Figura 49 - Tensão do barramento CC e a tensão CC de referência para uma variação de frequência

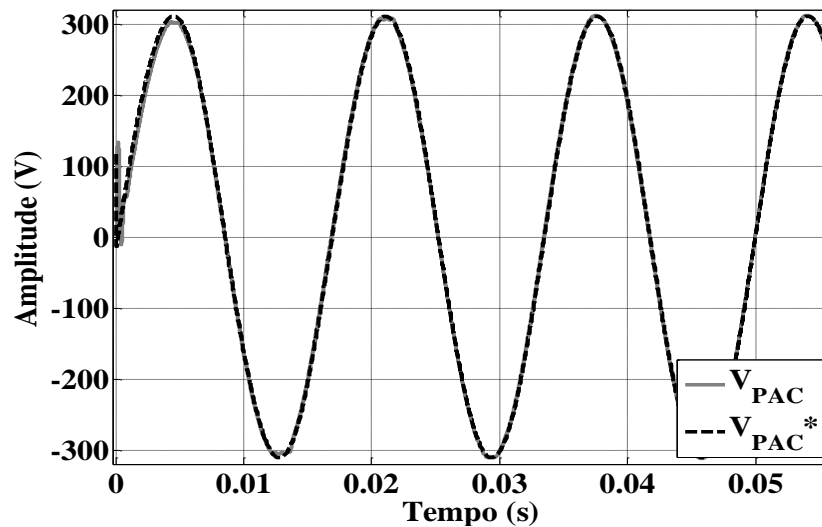


Figura 50 - Tensão no PAC e a tensão no PAC de referência para uma variação de frequência

3.4.2 Análise com variação dos parâmetros da rede

Muitos parâmetros são incertos quando se trata de uma rede de distribuição de energia elétrica, mesmo empregando um modelo simplificado para a rede. A impedância da rede é influenciada por muitos fatores, tais como configuração da rede e dos cabos, idade, temperatura e distâncias. Desta forma, é necessário avaliar os controladores projetados com variações dos parâmetros da rede, analisando o desempenho do sistema de controle perante estas variações.

Assim, a fim de avaliar o desempenho dos controladores com variações paramétricas, primeiramente variou-se a indutância da rede de 18 mH para 30 mH. A Figura 51 mostra as formas de onda da tensão de referência e da tensão do PAC com esse novo valor da indutância da rede, novamente aplicando um degrau de carga de operação a vazio para carga resistiva nominal. A Figura 52 apresenta a forma de onda da tensão da rede nesse ponto de operação. É possível observar a partir desses resultados que o sistema mantém um bom desempenho mesmo com uma significativa indutância da rede (0,24 pu).

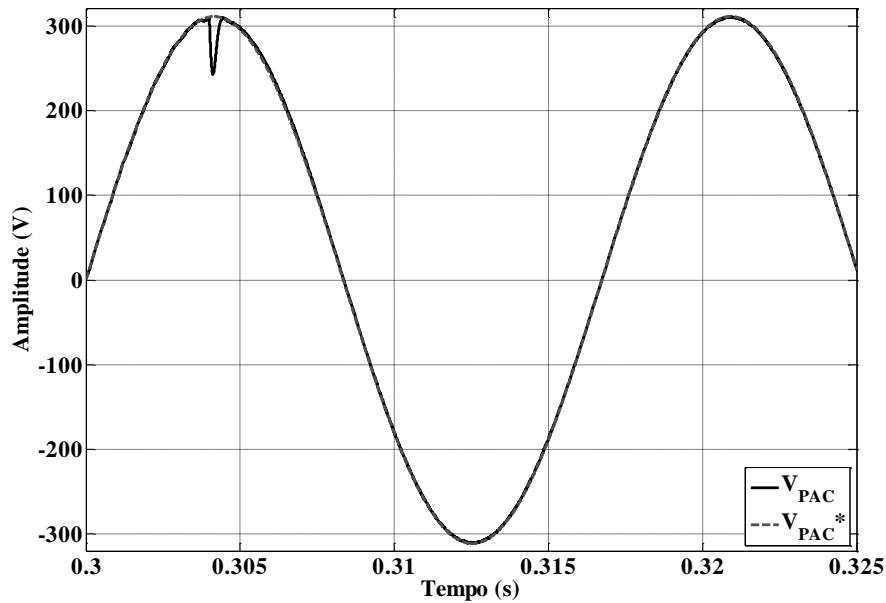


Figura 51 - Tensão no PAC e tensão de referência durante um degrau de carga, com variação da indutância da rede (30 mH)

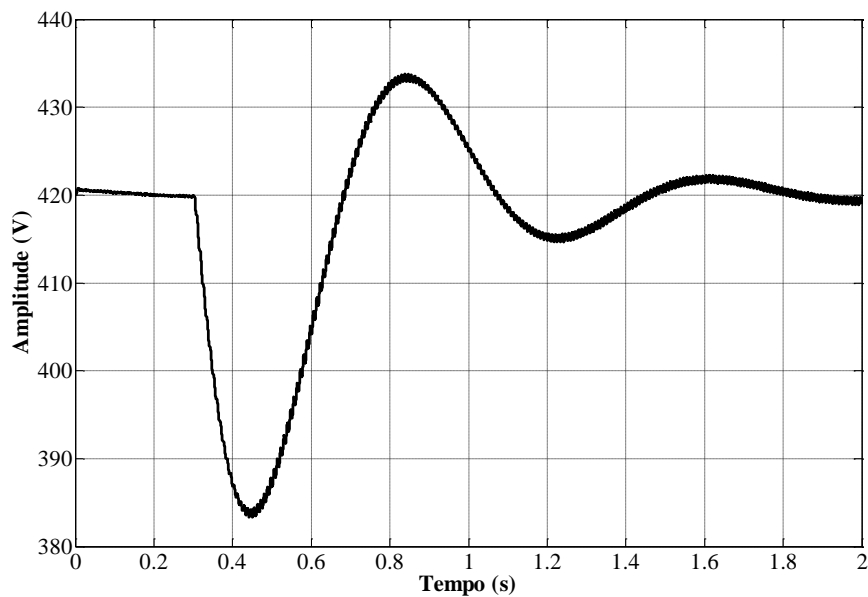


Figura 52 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga, com variação da indutância da rede (30 mH)

Agora, analisando os sistema de controle para uma variação da indutância da rede de 18 mH para 15 mH, Figura 53 e Figura 54, nota-se que a tensão no PAC tem o mesmo comportamento que o caso da variação para 30mH, porém a tensão do barramento CC torna-se mais oscilatória.

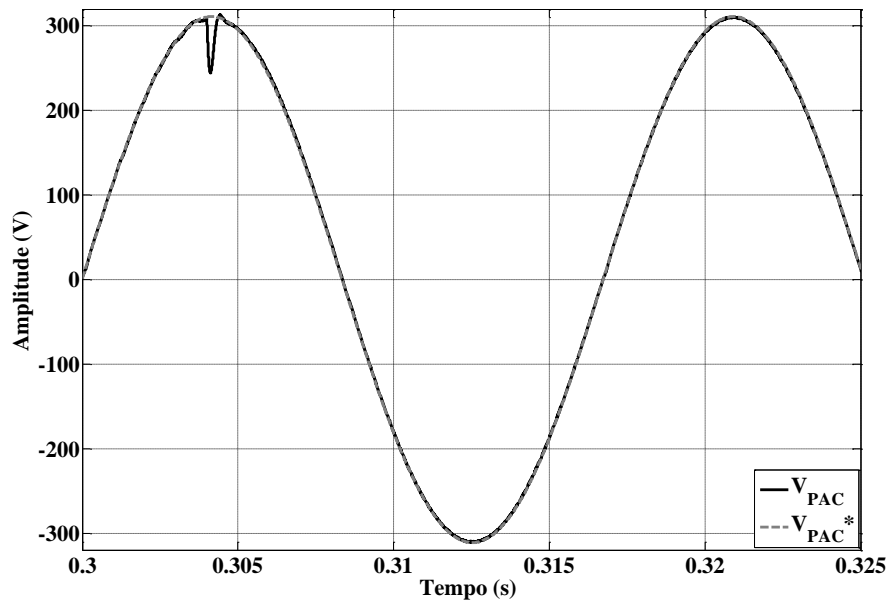


Figura 53 - Tensão no PAC e tensão de referência durante um degrau de carga, com variação da indutância da rede (15 mH)

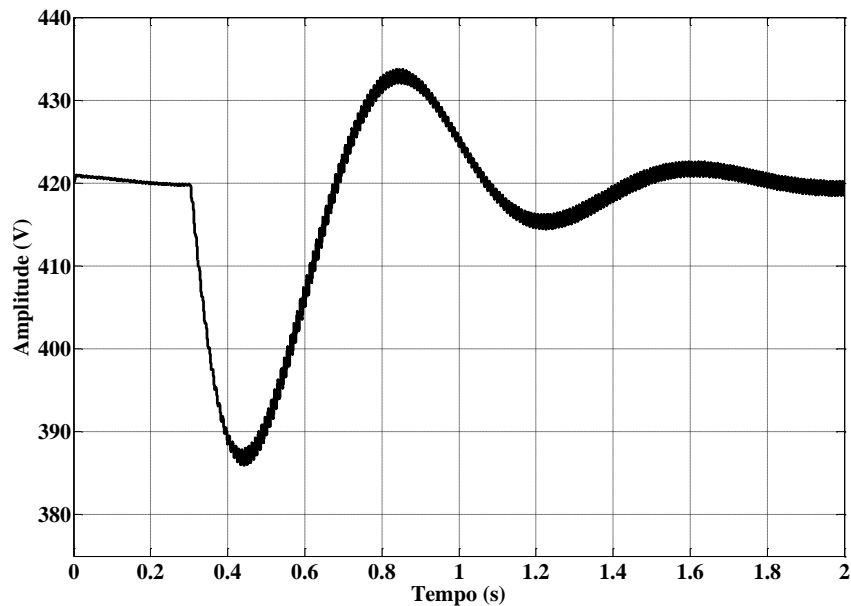


Figura 54 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga, com variação da indutância da rede (15 mH)

Na Figura 55 e na Figura 56 são mostradas as mesmas formas de onda com degrau de carga, porém agora variando a resistência da rede de 6Ω para 1Ω . Da mesma forma, os controladores compensaram o aumento de carga e mantiveram a tensão no barramento e a tensão do PAC em níveis desejados e com uma resposta transitória satisfatória. Nota-se que a tensão do barramento tem um tempo de acomodação menor.

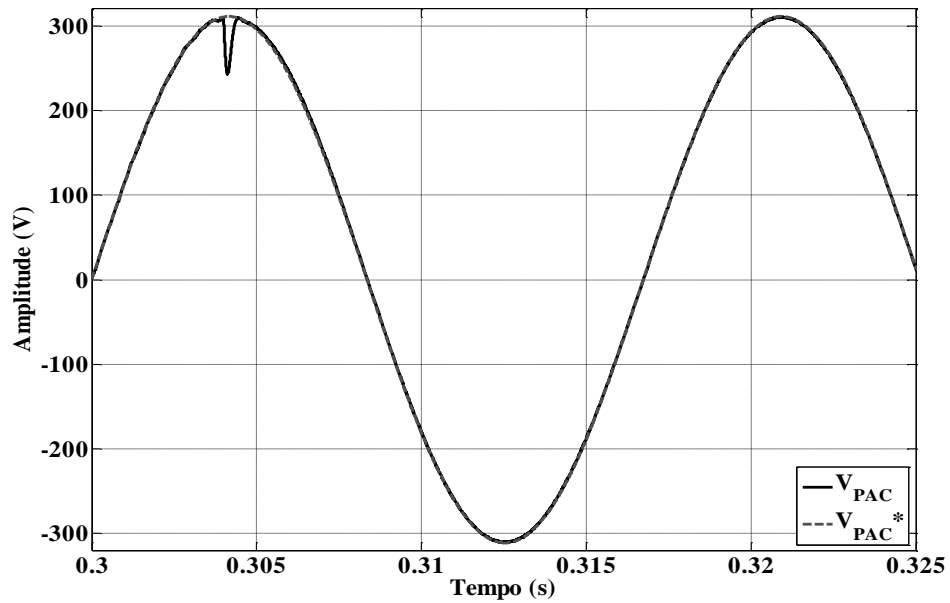


Figura 55 - Tensão no PAC e tensão de referência durante um degrau de carga, com variação da resistência da rede (1Ω)

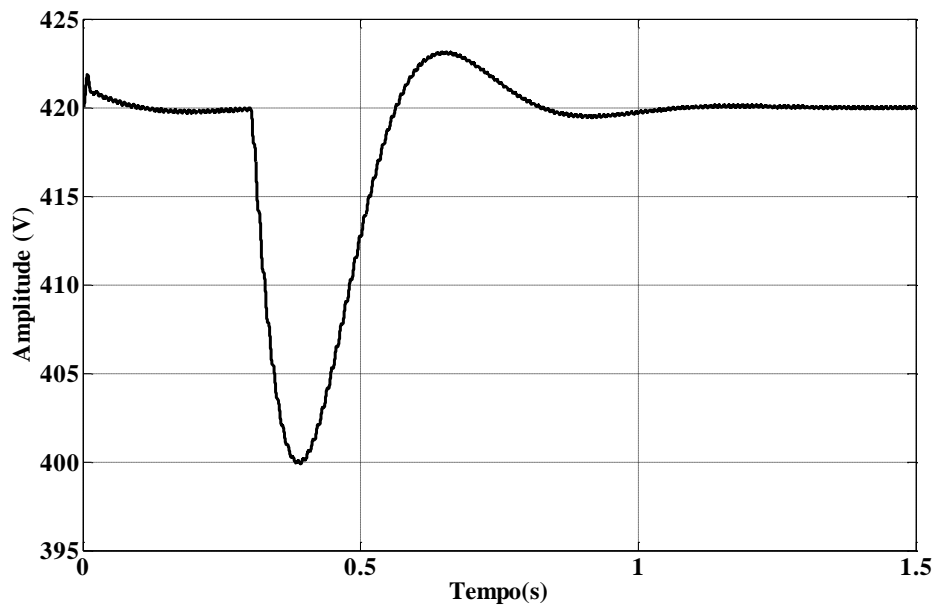


Figura 56 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga, com variação da resistência da rede (1Ω)

No caso apresentado na Figura 57 e na Figura 58, a resistência da rede é aumentada de 6Ω para 7Ω , assim como nos casos anteriores os controladores compensam este aumento de carga. Com esta alteração a tensão do barramento CC é mais oscilatória e necessita de um tempo maior para estabilizar.

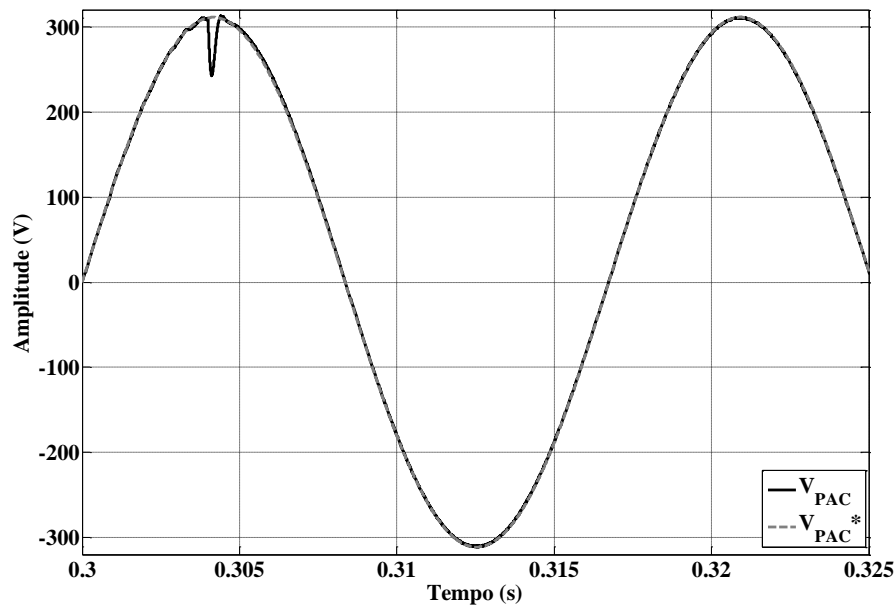


Figura 57 - Tensão no PAC e tensão de referência durante um degrau de carga, com variação da resistência da rede (7Ω)

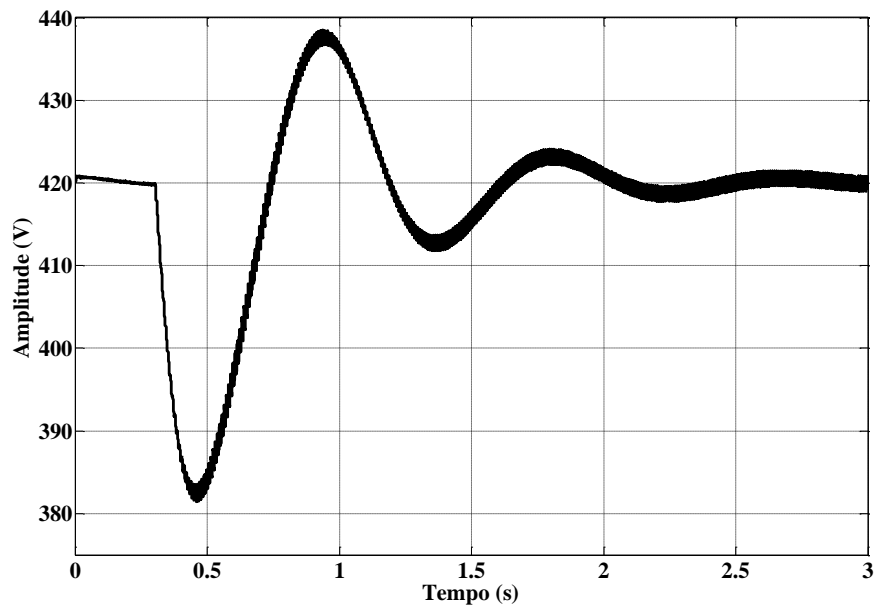


Figura 58 - Tensão do barramento CC durante um degrau de carga, com variação da resistência da rede (7Ω)

Agora, a fim de avaliar a estabilidade do sistema em malha fechada para uma ampla faixa de impedâncias, a Figura 59 e a Figura 60 mostram as localizações dos pólos em malha fechada da malha de controle da tensão do PAC com a variação da indutância da rede (L_r) e da resistência da rede (R_r), respectivamente. Em ambos os casos, os pólos permanecem no interior do círculo de raio unitário, indicando que o sistema permanece estável mesmo para grandes variações paramétricas.

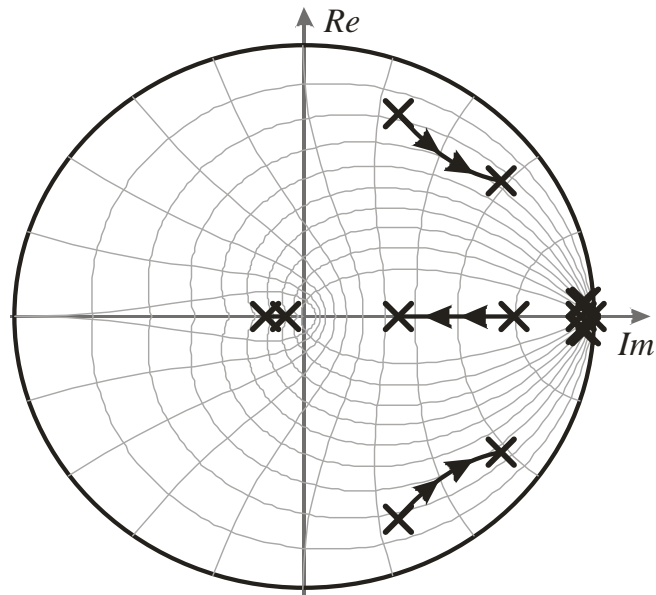


Figura 59 - Lugar das raízes dos polos em malha fechada com variação da indutância da rede ($L_r = 1 \text{ mH} \rightarrow 30 \text{ mH}$)

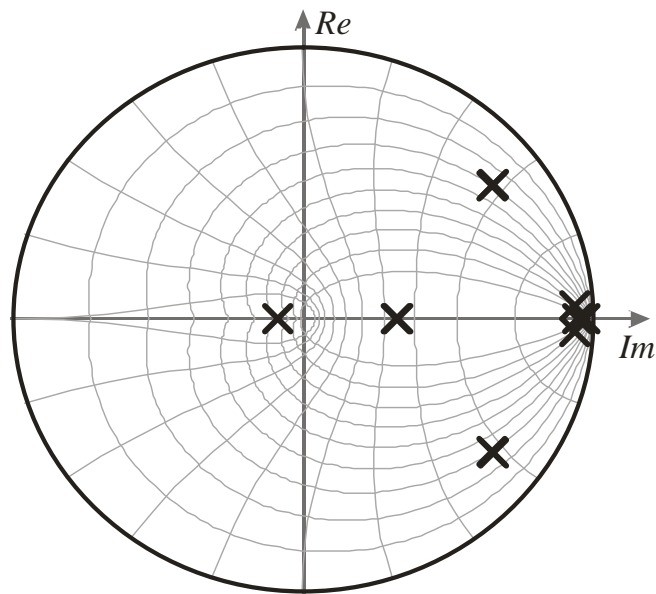


Figura 60 - Lugar das raízes dos polos em malha fechada com variação da resistência da rede ($R_r = 0,1 \Omega \rightarrow 10 \Omega$)

3.5 Conclusões parciais

Neste capítulo apresentou-se o equacionamento matemático para a obtenção dos dois modelos dinâmicos que compõem o sistema: o modelo do lado CA e o modelo da tensão do barramento CC. Com a obtenção destes modelos, o projeto do sistema de controle proposto

pode ser desenvolvido, este que é composto por três malhas: a de amortecimento, a malha de controle da tensão CA e a malha de controle da tensão CC. Os principais objetivos destes controladores é regular a tensão no PAC e manter os capacitores que compõem o barramento CC carregados.

Os resultados apresentados comprovam que a análise teórica e metodologia utilizada para projetar o sistema de controle estão adequadas. Esses resultados demonstram que o sistema apresenta uma resposta satisfatória sob as variações de carga, bem como variações paramétricas da rede. Além disso, a técnica de amortecimento ativo empregada garantiu a redução do pico de ressonância, o que acaba por facilitar o projeto de controladores clássicos, evitando, assim, o uso de técnicas de controle mais complexas.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um protótipo do sistema de regulação foi construído em laboratório, como mostrado na Figura 61, para avaliar o desempenho do sistema de controle digital proposto.

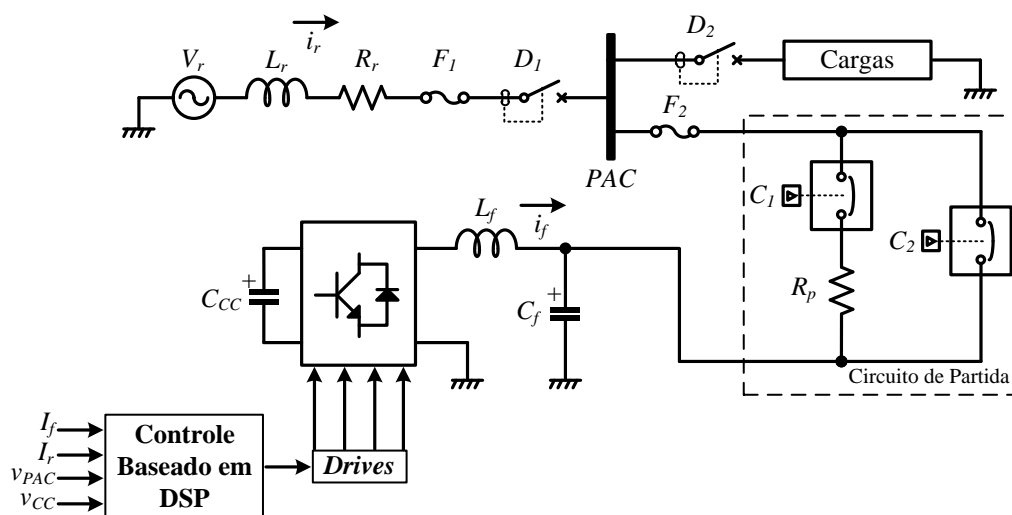


Figura 61 - Diagrama simplificado do sistema implementado em laboratório

Os parâmetros utilizados para a implementação do protótipo foram os mesmos adotados na simulação, sendo novamente apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros do sistema implementado

Parâmetros	Valor
Tensão nominal da rede (V_r)	220 V _{RMS} / 60 Hz
Potência nominal	1 kVA
Tensão nominal do barramento CC (V_{CC})	420 V
Frequência de comutação (f_s)	19,98 kHz
Indutância da rede (L_r)	18 mH (0,14 pu)
Resistência da rede (R_r)	6 Ω (0,14 pu)
Indutância de filtro (L_f)	1 mH
Capacitância de filtro (C_f)	6 μF

O kit de desenvolvimento eZdsp F28335 produzido pela Texas Instruments, que possui o processador digital de sinais TMS320F28335 [48], foi utilizado para implementar o sistema de controle. Os compensadores implementados no DSP são os mesmos projetados no Capítulo 3, sendo novamente mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Compensadores implementados

Compensador da tensão do PAC	$C_R(z) = 0,0012458 \frac{(z - 0,2843)(z^2 - 1,925z + 0,9271)}{(z^2 - 2z + 1)(z - 0,9164)}$
Compensador da tensão do barramento CC	$C_{PI}(z)C_N(z) = -0,0041096 \frac{(z + 0,9993)(z^2 - 1,999z + 1)}{(z - 1)(z^2 - 1,992z + 0,9937)}$

Convém destacar que os ganhos dos sensores de tensão e de corrente foram internamente compensados no DSP, de tal forma que os ganhos de todos os circuitos de instrumentação e condicionamento de sinais são unitários.

Uma descrição detalhada do protótipo é apresentada no Apêndice A.

4.1 Resultados experimentais sem a conexão do D-STATCOM

Os resultados experimentais são apresentados para duas condições de carga: a vazio e com carga resistiva nominal. Em um primeiro momento foi aplicado um degrau entre essas duas condições de carga, sem conectar o D-STATCOM no PAC. Na Figura 62 pode-se observar que ocorre uma queda de tensão no instante que a carga é conectada, reduzindo a tensão no PAC de 220 VRMS para 190 VRMS. Esse valor de tensão está classificado na faixa precária, de acordo com o Módulo 8 do PRODIST. Além disso, na Figura 61 é mostrado apenas um ciclo da tensão de saída no instante do degrau de carga, sendo possível observar o significativo afundamento temporário de tensão durante o degrau de carga.

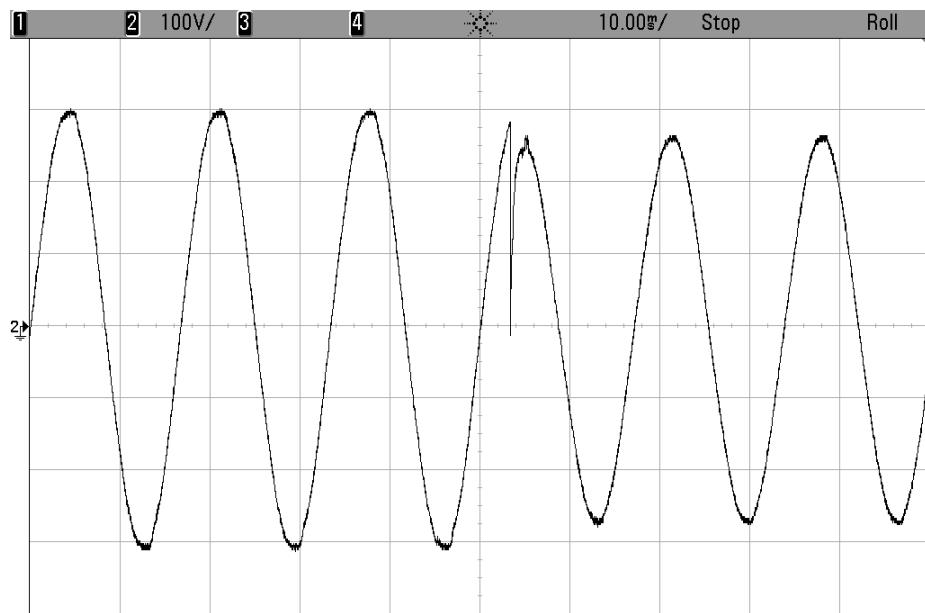


Figura 62 - Resultado experimental sem D-STATCOM: Tensão no PAC durante degrau de carga de operação a vazio para carga resistiva nominal



Figura 63 - Resultado experimental sem D-STATCOM: Detalhe da tensão no PAC durante degrau de carga de operação a vazio para carga resistiva nominal

4.2 Resultados experimentais com a conexão do D-STATCOM

4.2.1 Carga dos capacitores do barramento CC

Para a adequada operação do D-STATCOM, os capacitores do barramento CC devem estar carregados com sua tensão nominal. Como previamente à conexão do D-STATCOM na rede de distribuição os capacitores do barramento estão descarregados, deve-se adotar um procedimento para a conexão do D-STATCOM na rede e para a carga adequada do barramento CC. Contudo, neste trabalho, o circuito de sincronismo foi mantido em funcionamento durante a operação do D-STATCOM para obtenção dos resultados experimentais.

Um circuito de partida e proteção foi desenvolvido para permitir a carga adequada do barramento CC e também desconectar o inversor PWM da rede no caso de uma situação atípica (falta, sobrecarga, etc.). O circuito de partida destacado na Figura 61 é composto por duas contadoras (C_1 e C_2) e uma resistência de partida ($R_p = 3\Omega$).

O circuito de partida opera da seguinte maneira: (i) ao energizar o circuito, o DSP é ligado para que seja possível controlar as contadoras; (ii) os interruptores do inversor PWM permanecem desligadas e inicia-se o processo de carga do barramento CC com o acionamento da contadora C_1 . Nesse período, o inversor opera como retificador monofásico não controlado através dos diodos em antiparalelo dos interruptores; (iii) após um período de tempo suficiente para que ocorra a pré-carga do capacitor do barramento CC, a contadora K_2 é acionada pelo DSP, retirando a resistência R_p do circuito, bem como é iniciada a operação do sistema de controle digital no DSP, enviando sinais *PWM* aos interruptores. Durante esse período, o inversor já opera de forma controlada, com o sinal de referência da tensão do barramento CC crescendo em rampa até atingir a tensão nominal.

A Figura 64 mostra a forma de onda da tensão no barramento CC durante a conexão do D-STATCOM na rede. É possível verificar que a tensão do barramento inicialmente cresce de forma exponencial (operação como retificador controlado), até o acionamento da contadora K_2 . Nesse momento, a tensão passa a crescer de forma aproximadamente linear, devido ao crescimento em rampa da tensão de referência, até atingir o valor nominal da tensão do barramento CC.

A Figura 65 apresenta a corrente no inversor durante a carga do barramento CC, pode-se notar que a corrente não atinge níveis elevados durante este período.

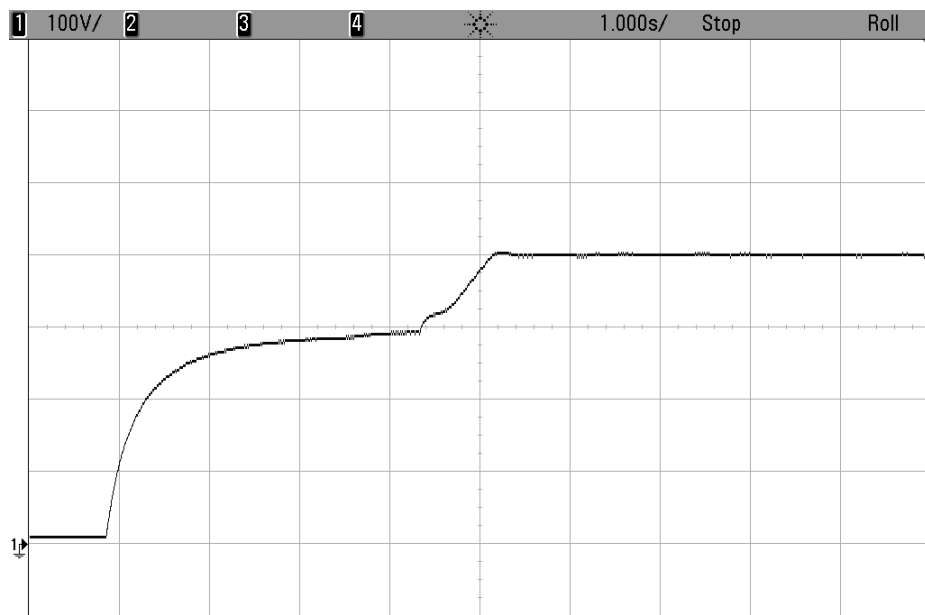


Figura 64 - Resultado experimental com D-STATCOM: Carga dos capacitores do barramento CC

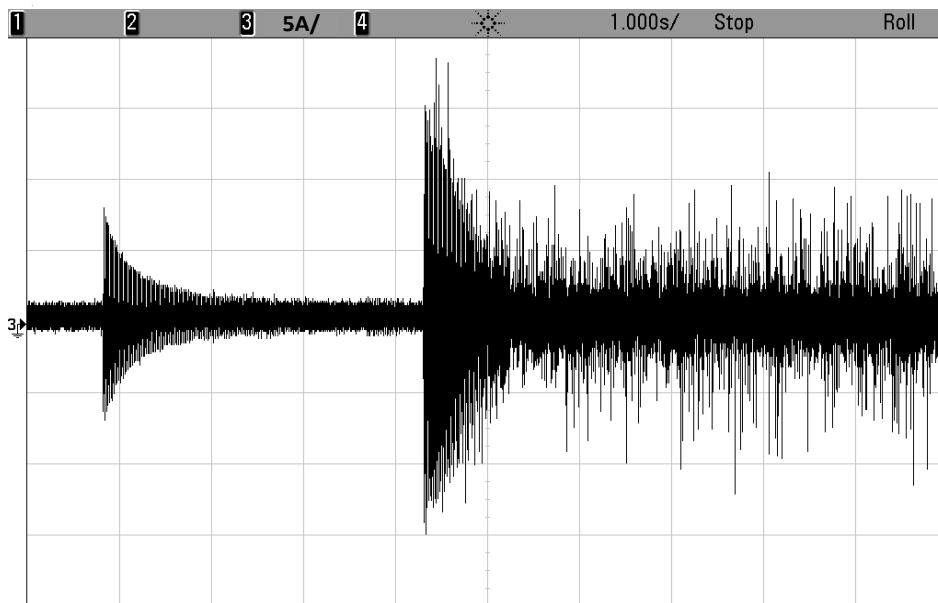


Figura 65 - Resultado experimental com D-STATCOM: Corrente no inversor durante a partida

4.2.2 Variações de carga

Uma vez realizada a conexão do D-STATCOM no PAC e a carga dos capacitores do barramento CC, pode-se avaliar a operação do D-STATCOM em condições de operação distintas. Inicialmente, é avaliada a resposta transitória do D-STATCOM com variações de carga, tanto na entrada quanto na retirada de carga.

A Figura 66 mostra a forma de onda da tensão do PAC e da corrente de saída do inversor durante um degrau de carga, de operação a vazio para carga resistiva nominal. Observa-se que, ao contrário do resultado apresentado na Figura 63 a tensão no PAC é reestabelecida rapidamente em seu valor nominal devido à ação do D-STATCOM. No instante do degrau de carga, o inversor PWM atua no sentido de manter a tensão no PAC em seu valor nominal, ocorrendo um aumento da corrente de saída do inversor.

Uma vez que a malha de tensão CC é lenta para ajustar o ângulo θ da tensão de referência do PAC, o inversor PWM temporariamente fornece potência ativa para a rede. Entretanto, com a atuação da malha de controle da tensão do barramento CC, as formas de onda da tensão do PAC e da corrente do inversor permanecem aproximadamente em quadratura após o período transitório, que pode ser observado na Figura 71 instantes antes da retirada de carga. Assim, indicando que o D-STATCOM processa essencialmente potência reativa em regime permanente.

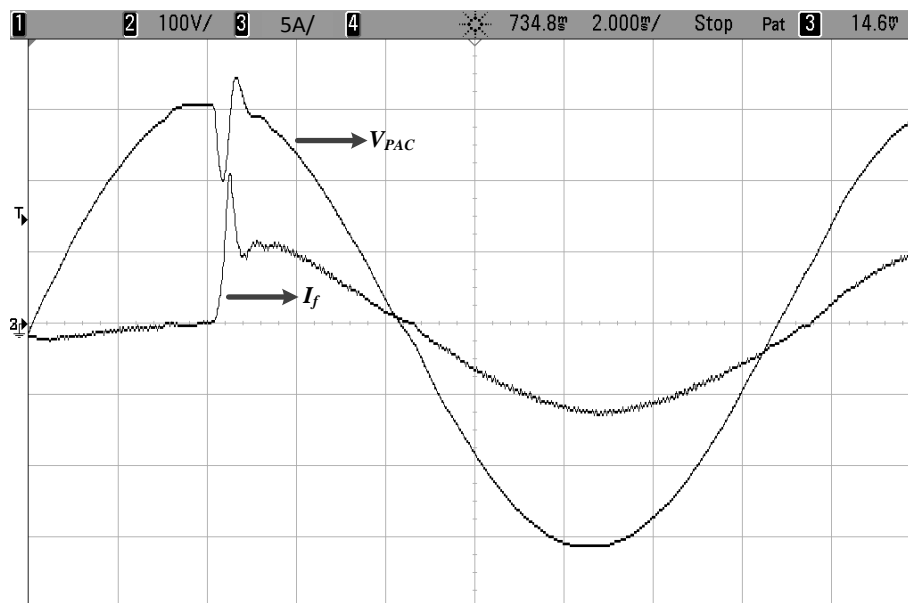


Figura 66 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no PAC e corrente no indutor de filtro para entrada de carga

Conforme destacado, a malha de tensão do barramento CC atua no sentido de manter a tensão do barramento CC regulada em seu valor nominal. Na Figura 67 é apresentada a forma de onda da tensão do barramento CC no instante do degrau de carga, ocorrendo um afundamento de aproximadamente 40 V no momento em que a carga é conectada. Contudo, em regime permanente a tensão CC permanece regulada.

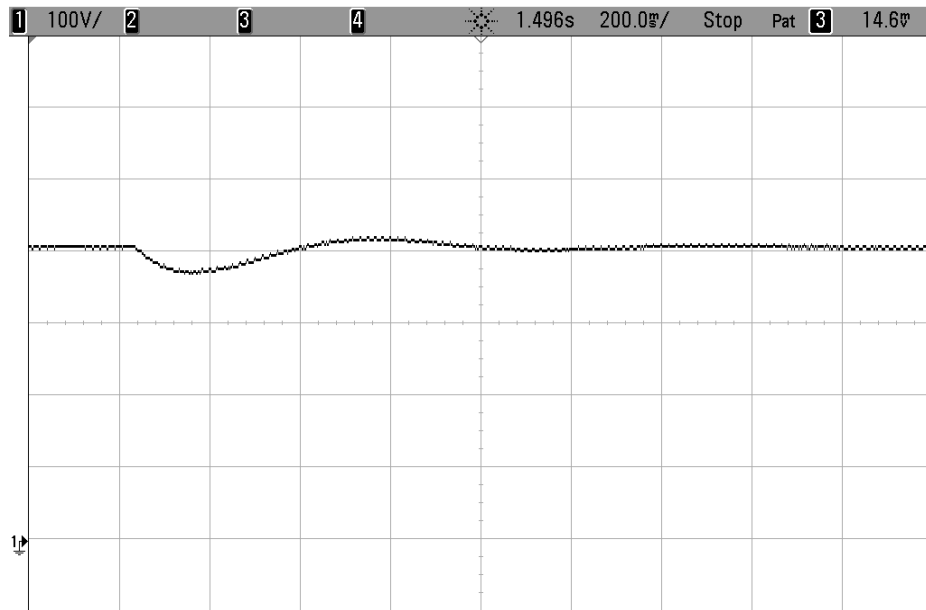


Figura 67 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão do barramento CC para entrada de carga

Através de *buffers* internos do DSP é possível obter as ações de controle da malha de tensão do PAC, mostrada na Figura 68, e da malha de tensão do barramento CC, apresentada na Figura 69. No momento em que a carga é conectada, a malha de controle CA varia para compensar a queda de tensão no PAC e a ação de controle CC varia para ajustar o ângulo θ , restaurando a tensão de operação do barramento CC.

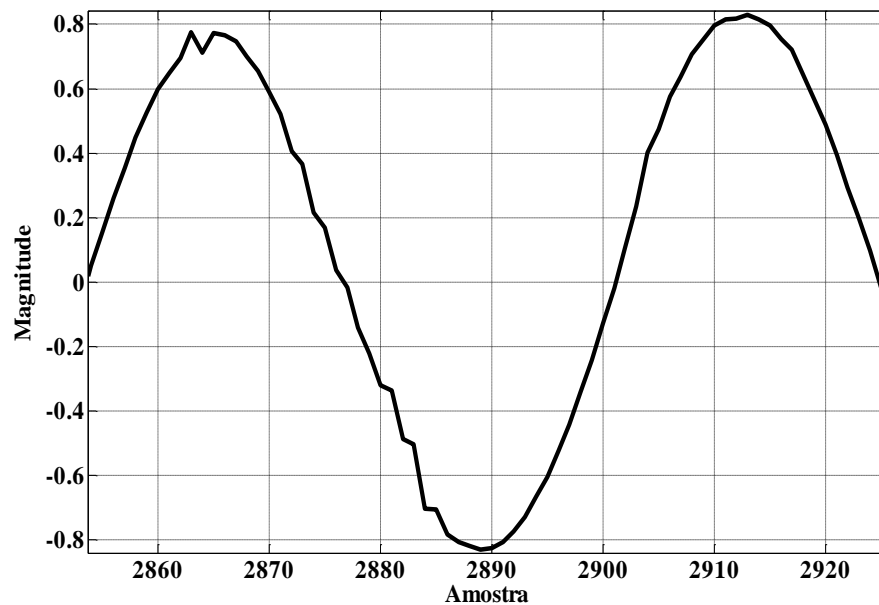


Figura 68 - Resultado experimental com D-STATCOM: Ação de controle CA

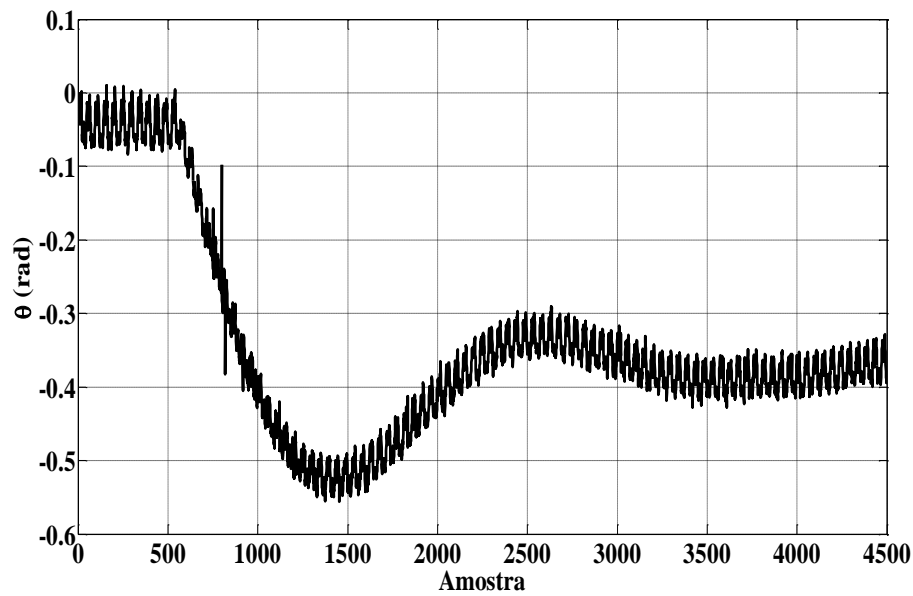


Figura 69 - Resultado experimental com D-STATCOM: Ação de controle CC

O sistema de controle digital proposto também foi testado com retirada de carga, variando bruscamente de carga resistiva nominal para operação a vazio. A Figura 70 mostra a forma de onda da tensão do PAC no instante da retirada de carga, onde se pode verificar que o D-STATCOM rapidamente atua para manter a tensão no PAC em seu valor nominal.

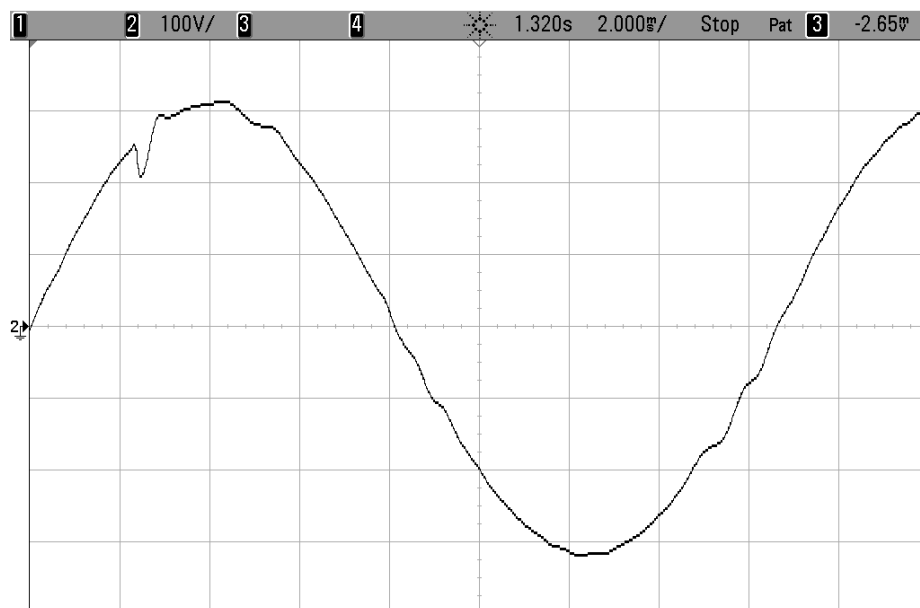


Figura 70 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no ponto de acoplamento comum para retirada

A Figura 71 mostra a forma de onda da corrente de saída do inversor, juntamente com a tensão no PAC. Ao ocorrer à retirada de carga, a corrente no inversor inicialmente cresce, pois a malha de tensão CC ainda não corrigiu o ângulo θ para a nova situação de carga. Entretanto, com a atuação da malha de tensão CC, a corrente no inversor é reduzida significativamente para operação a vazio, como apresentado na Figura 72.

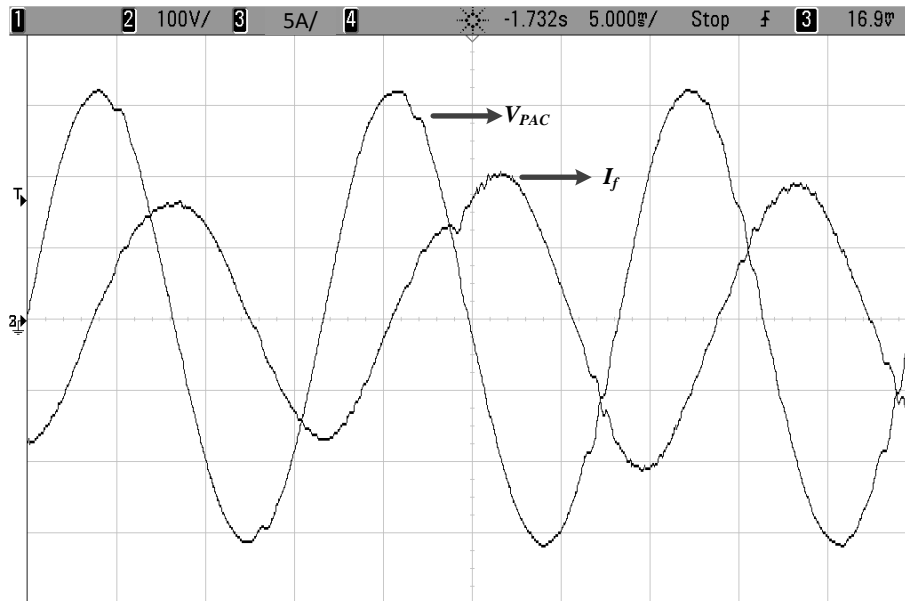


Figura 71 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no PAC e corrente no indutor de filtro para retirada de carga

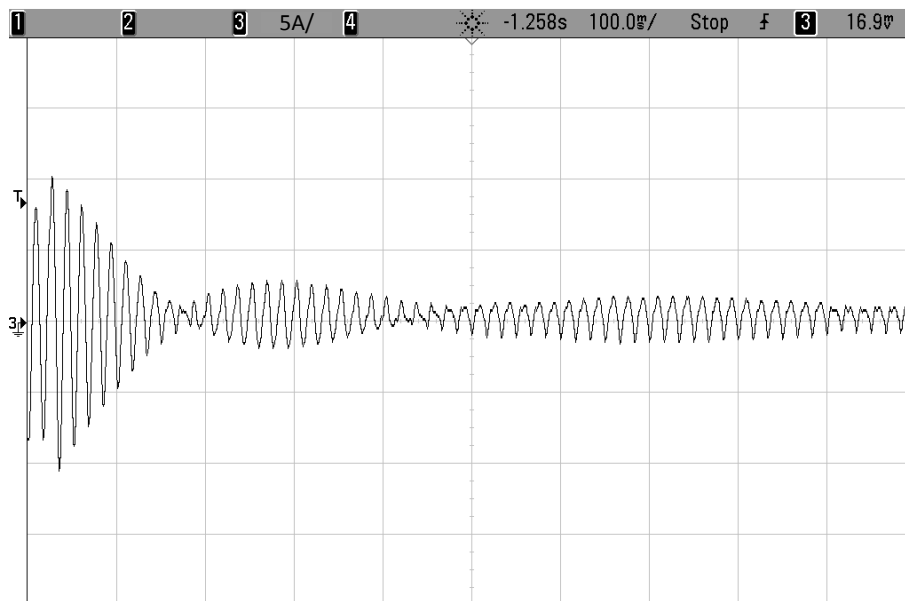


Figura 72 - Resultado experimental com D-STATCOM: Corrente no indutor de filtro para retirada de carga

Na Figura 73 observa-se a tensão do barramento CC no instante da retirada de carga, sendo possível observar uma sobretensão transitória no instante em que a carga é retirada. Entretanto, a tensão do barramento CC é regulada em seu valor nominal em regime novamente.

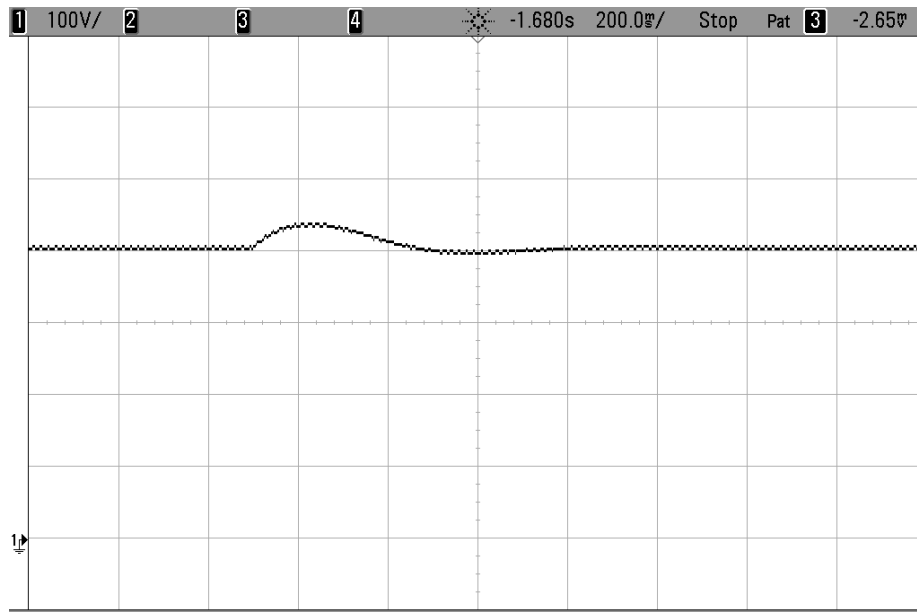


Figura 73 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão do barramento CC para entrada de carga

4.2.3 Variações paramétricas

Como a impedância da rede é um parâmetro que pode apresentar grandes variações, é necessário avaliar o desempenho do sistema com variações paramétricas.

Inicialmente, a resistência da rede foi alterada de 6Ω para 1Ω . Na Figura 74 são apresentadas as formas de onda da tensão no ponto de acoplamento e da corrente no indutor de filtro no instante de um degrau de carga de operação a vazio para carga resistiva nominal.

Na Figura 75 apresenta-se a tensão do barramento CC no instante do degrau de carga, observando-se um afundamento transitório da tensão CC. Pode-se notar que o sistema de controle manteve-se com estável e com bom desempenho para variação paramétrica da resistência da rede.

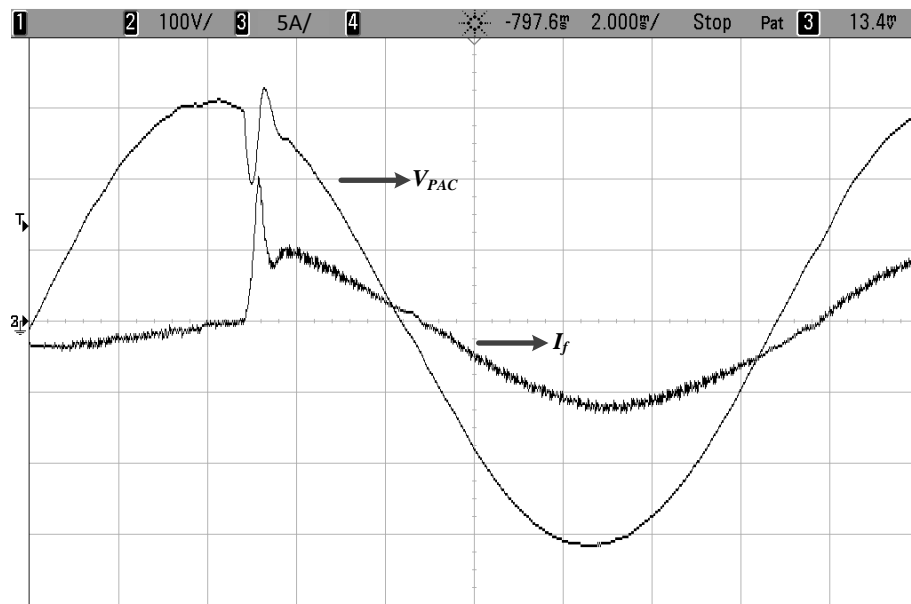


Figura 74 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no PAC e corrente no indutor de filtro para variação de R_r .

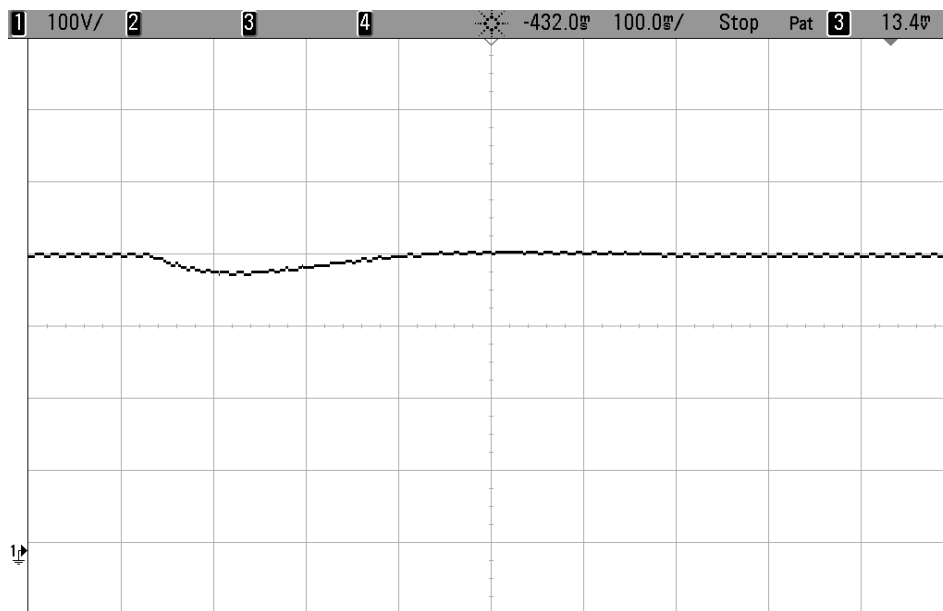


Figura 75 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão do barramento CC com variação de R_r .

De forma similar a indutância da rede foi alterada de 18 mH para 30 mH para avaliar o desempenho do sistema de regulação com esta variação paramétrica. Na Figura 76 são mostradas as formas de onda da tensão no PAC e da corrente de saída do inversor, novamente para um degrau de carga de operação a vazio para carga resistiva nominal.

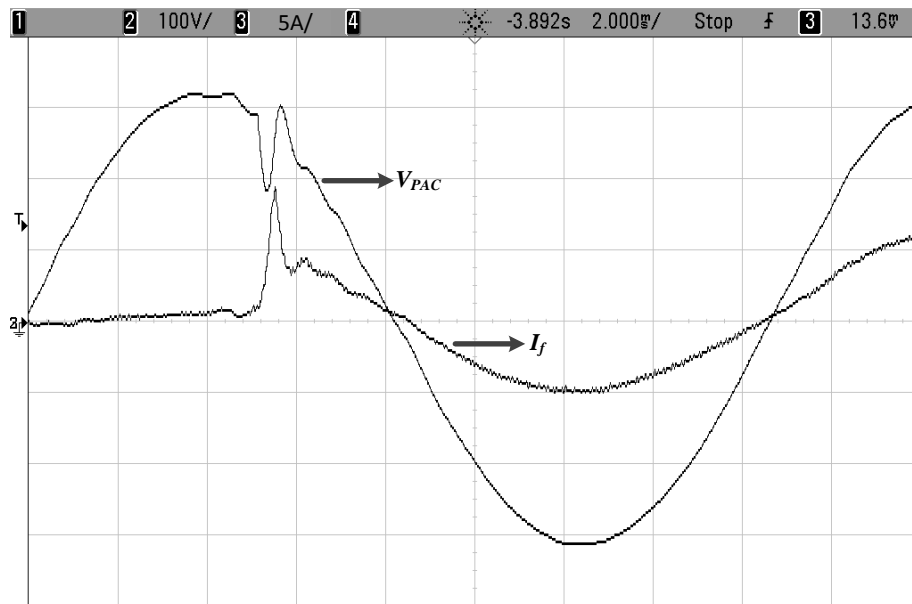


Figura 76 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão no PAC e corrente no indutor de filtro para variação de L_r .

Por fim, a Figura 77 apresenta a tensão do barramento CC no instante do degrau de carga, com uma indutância de rede de 30 mH. Novamente, percebe-se que o sistema manteve-se estável e com desempenho satisfatório, agora com variação paramétrica da indutância da rede.

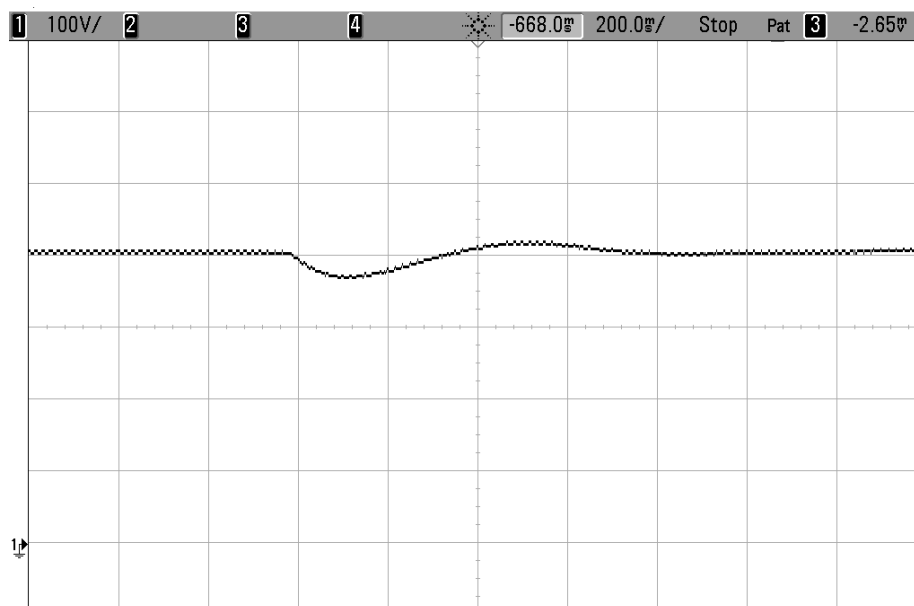


Figura 77 - Resultado experimental com D-STATCOM: Tensão do barramento CC com variação de L_r .

4.3 Conclusões parciais

Neste capítulo foram apresentados resultados experimentais obtidos na implementação de um D-STATCOM conectado em paralelo com a rede através de um filtro LC , onde o desempenho do sistema de controle proposto foi avaliado para diferentes condições de operação.

Assim como em simulação, os testes práticos apresentados nesta Dissertação avaliaram o desempenho do sistema sob degrau de carga, tanto para entrada como para retirada de carga, e também para variações paramétricas, tanto da indutância quanto da resistência da rede. Em ambos os casos, os objetivos de controle foram atingidos, ou seja, a tensão no PAC e no barramento CC foram regulados com resposta transitória adequada.

Além disso, pode-se notar que temporariamente o D-STATCOM fornece potência ativa para a rede, isso ocorre apenas no instante do degrau de carga, e após, com o ajuste do ângulo θ , a tensão e a corrente ficam em quadratura, e desta forma, garantindo apenas o processamento de potência reativa.

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Garantir um fornecimento de energia elétrica confiável e de qualidade é uma das principais preocupações das concessionárias de energia elétrica. Nos últimos anos, os órgãos responsáveis estão intensificando as fiscalizações e punindo as concessionárias que fornecem tensões fora dos limites adequados. Para diminuir este problema, equipamentos de fácil instalação e que sejam capazes de restaurar a tensão conforme as exigências do PRODIST poderiam ser provisoriamente instalados em pontos com níveis de tensão inadequados, enquanto uma solução definitiva não for executada pela concessionária.

Nesse sentido, esta Dissertação de Mestrado propõe a utilização de um D-STATCOM para redes monofásicas rurais de baixa tensão, uma vez que tais redes usualmente possuem linhas longas e com significativa impedância, muitas vezes resultando em níveis de tensão precários ou críticos. Com o objetivo de ser utilizado como uma solução temporária, o D-STATCOM pode ser conectado a rede enquanto manutenções, melhorias ou projetos são executados no sistema. Desta forma, a concessionária não é penalizada e os consumidores terão um fornecimento de energia elétrica com qualidade.

A tensão de fornecimento é influenciada por vários fatores e parâmetros, tais como a impedância da linha e o tipo e a potência da carga. Desta forma, no Capítulo 2 foi apresentada uma análise em regime permanente do comportamento da tensão no ponto de acoplamento comum, variando os parâmetros da impedância da linha e da carga. Também foi realizada uma comparação com os índices estipulados pela ANEEL, justificando a utilização do D-STATCOM para linhas de distribuição longas. No Capítulo 2 também foi apresentada uma análise em regime permanente do sistema de regulação, onde as correntes da rede, da linha e da carga foram equacionadas, bem como as respectivas potências. Estas informações possibilitaram o cálculo do ângulo θ da tensão de referência do PAC e, desta forma, determinar a potência reativa processada pelo D-STATCOM em função da carga, da impedância da rede de alimentação e da amplitude da tensão de referência do PAC. Observou-se que para linhas longas e para cargas nominais, predominantemente indutivas e resistivas, o D-STATCOM pode processar potências reativas em torno de 1,5 pu, contudo, sem a necessidade de interromper a rede de distribuição e também sem precisar usar transformador de acoplamento.

No Capítulo 3, esta Dissertação de Mestrado propôs um sistema de controle digital para o D-STATCOM em análise. Como o D-STATCOM foi conectado ao PAC através de um

filtro *LC* passa-baixas, para minimizar os harmônicos de alta frequência produzidos pelo inversor PWM, a planta pode ser visualizada como um inversor PWM conectado à rede através de um circuito *LCL*, composto pelo filtro *LC* e pela impedância da rede. Nesse sentido, o sistema de controle proposto neste trabalho realiza três funções básicas: amortecimento ativo da ressonância do circuito *LCL*, controle da tensão do PAC e regulação da tensão do barramento CC do inversor. A modelagem dinâmica completa do sistema de regulação foi mostrada no Capítulo 3, possibilitando realizar o projeto de todos os compensadores que compõem o sistema de controle proposta. Resultados de simulação com variações de carga e com variações paramétricas também foram incluídas nesse capítulo. Percebeu-se que, mesmo com grandes variações paramétricas da impedância da rede, o sistema em malha fechada permaneceu estável (polos em malha fechada no interior do círculo unitário) e com bom desempenho. A fim de validar o sistema de controle proposto e os projetos apresentados no Capítulo 3, um protótipo foi desenvolvido em laboratório, com o sistema de controle implementado em um DSP. Diversos resultados foram incluídos no Capítulo 4, avaliando o desempenho do sistema de controle digital proposto com variações de carga e da impedância da rede. O sistema de controle manteve as tensões do PAC e do barramento CC reguladas em regime permanente e também apresentou uma rápida resposta transitória com distúrbios de carga. Assim, pode-se afirmar que o objetivo geral desta Dissertação de Mestrado foi atingido, pois o sistema atendeu as especificações impostas:

- manter a amplitude da tensão de atendimento em níveis adequados mesmo com variações da carga e da rede;
- possuir um tempo de resposta compatível com os valores definidos pela ANEEL; e
- regular a tensão do PAC mesmo com grandes variações paramétricas da rede, permitindo a aplicação do sistema em diferentes pontos da rede de baixa tensão.

Assim, o sistema poderá ser usado como uma solução imediata para resolver os problemas relacionados com a violação dos limites de tensão impostos pela ANEEL, possibilitando que a concessionária possa realizar os estudos necessários para implementar uma solução definitiva. Além disso, é importante ressaltar que os objetivos específicos desta pesquisa também foram atendidos, dentre eles: projeto da estrutura de potência do inversor PWM monofásico, análise dos modelos dinâmicos que descrevem o inversor PWM monofásico, o filtro e a conexão com a rede de distribuição de energia, definição e projeto do sistema de controle digital, implementação do sistema de regulação de tensão, formado pela

parte de potência (inversor, filtro e rede) e de controle (instrumentação e programação em um DSP), validação experimental do sistema de regulação desenvolvido para diferentes condições de carga e com variações paramétricas da rede de distribuição.

Proposta para trabalhos futuros

- Análise do circuito de sincronismo sem a necessidade da medição da tensão da rede;
- Projeto e implementação de retroação parcial de estados, sem a corrente da rede, para realizar o amortecimento ativo da ressonância;
- Análise e estudo das proteções e adequações para a instalação em campo do protótipo;
- Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento para variar a amplitude da tensão do PAC dentro da faixa de tensão adequada, visando a redução de potência.

Artigos resultantes desse trabalho aprovados em conferências nacionais e internacionais

- T. P. Enderle, G. S. da Silva, C. Fischer, R. C. Beltrame, V. F. Montagner, L. Schuch and C. Rech. “Analysis and Control of a D-STATCOM in Single-Phase Distribution Networks,” in *Power Electronics South America (PCIM)*, Setember, 2012.
- T. P. Enderle, G. S. da Silva, C. Fischer, R. C. Beltrame, V. F. Montagner, L. Schuch e C. Rech. “D-STATCOM Applied to Single-Phase Distribution Networks: Modeling and Control,” *IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, October 2012.
- T. P. Enderle, G. S. da Silva, C. Fischer, R. C. Beltrame, V. F. Montagner, L. Schuch e C. Rech. “Análise e controle de um D-STATCOM para redes de distribuição monofásicas” Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Setembro, 2012.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, de 06 de setembro de 2011.
- [2] HAFFNER, S.; ALVES, M. L., “Alocação ótima de bancos de capacitores e reguladores de tensão em redes radiais de distribuição de energia elétrica”, *Sixth Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission*, pp. 1-8, 2005.
- [3] CIVALAR, S.; GRAINGER, J. J., “Volt/var control on distribution system with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators, Part II: The solution method”, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No.11, pp. 3284-3290, 1985.
- [4] GRAINGER J. J.; CIVALAR S., “Volt/var control on distribution system with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators, Part I: The overall problem”, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No.11, pp. 3278-3283, 1985.
- [5] CIVALAR, S.; GRAINGER, J. J., “Volt/var control on distribution system with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators, Part III: The numerical results”, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No.11, pp. 3291-3297, 1985.
- [6] MENDES A.; FRANCA P.M.; LYRA C.; PISSARRA C.; CAVELLUCCI C., “Capacitor placement in large sized radial distribution networks”, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 152, No., pp. 496-502, 2005.
- [7] PADILHA; L. N., “Análise Comparativa de Estratégias de Regulação de Tensão em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Distribuídos,”. Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 2010.
- [8] SINGH, B.; SOLANKI, J.; VERMA, V., “Neural Network Based Control of Reduced Rating DSTATCOM,” *INDICON, 2005 Annual IEEE*, vol., no., pp. 516- 520, 11-13 Dec. 2005.
- [9] GOMEZ, E. A.; MONROY, B. D., “ Solid-State Tap Changers: New Configurations and Applications,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 4, p. 2228-2235, 2007.
- [10] SCHUCH, L.; BELTRAME, R. C. ; CAZAKEVICIUS, F. E. ; CAMARGO, R. F. ; MICHELS, L. ; RECH, Cassiano ; MARCHESAN, T. B. “ Comutador eletrônico de taps aplicado a um transformador de distribuição monofásico,” *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2012.

- [11] MANJREKAR, M.; VENKATARAMANAN, G., "Control strategies for a hybrid static reactive compensator," *Electrical and Computer Engineering*, vol.2, pp.834-837 vol.2, 26-29, 1996.
- [12] ARNOLD, R. Solutions to the power quality problem. *Power Engineering Journal*, v. 15, n. 2, p. 65-73, 2001.
- [13] ERRABELLI, R.R.; KOLHATKAR, Y.Y.; DAS, S.P., "Experimental investigation of sliding mode control of inverter for custom power applications," *Power Engineering Society General Meeting*, pp.8 pp., 0-0 0, 2006.
- [14] HINGORANI N. G., "Introducing custom power," *IEEE spectrum*, vol. 32, pp. 41-48, 1995.
- [15] HATAMI, H.; SHAHNIA, F.; PASHAEI, A.; HOSSEINI, S.H., "Investigation on D-STATCOM and DVR Operation for Voltage Control in Distribution Networks with a New Control Strategy," *IEEE Lausanne Power Tech*, pp.2207-2212, 1-5, 2007.
- [16] PAL, Y.; SWARUP, A.; SINGH, B., "A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement," *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, 2008.
- [17] SAHOO, A.K.; THYAGARAJAN, T., "Modeling of facts and custom power devices in distribution network to improve power quality," *Power Systems International Conference on*, pp.1-7, 27-29, 2009.
- [18] HAQUE, M.H., "Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM," *Power Tech Proceedings*, vol.1, pp.5 pp. vol.1, 2001.
- [19] GUPTA, R.; GHOSH, A.; JOSHI, A., "Performance Comparison of VSC-Based Shunt and Series Compensators Used for Load Voltage Control in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.26, no.1, pp.268-278, 2011.
- [20] HOSSEINI, S. H.; NAZARLOO, A.; BABAEI, E., "Application of D-STATCOM to improve distribution system performance with balanced and unbalanced fault conditions," *Electric Power and Energy Conference (EPEC)*, pp.1-6, 25-27, 2010.
- [21] VASUDEVANAIIDU, P.; TECH, M.; NARENDRA KUMAR, Y., "A new simple modeling and analysis of custom power controllers," *International Conference on Power Systems*, pp.1-6, 27-29, 2009.
- [22] BONGIORNO, M.; SVENSSON, J., "Voltage dip mitigation using shunt-connected voltage source converter", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 22, No. 5, pp. 1867-1874, 2007.
- [23] GHOSH, A.; LEDWICH, G., "Load compensating DSTATCOM in weak AC systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.18, no.4, pp. 1302- 1309,

2003.

- [24] LEDWICH, G.; GHOSH, A., "A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol.149, no.2, pp.215-224, 2002.
- [25] SINGH, B.; ADYA, A.; MITTAL, A.P.; GUPTA, J.R.P., "Modeling, Design and Analysis of Different Controllers for DSTATCOM," *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, pp.1-8, 12-15, 2008.
- [26] ELDERY M. A; EL-SAADANY E. F.; SALAMA M. M. A., "Sliding Mode Controller For Pulse Width Modulation Based DSTATCOM," *Electrical and Computer Engineering*, pp.2216-2219, 2006.
- [27] MADHUSUDAN, R.; RAMAMOZHAN RAO, G., "Modeling and simulation of a distribution STATCOM (D-STATCOM) for power quality problems-voltage sag and swell based on Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)" *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)*, pp.436-441, 30-31, 2012.
- [28] MENNITI, D.; PINNARELLI, A.; SORRENTINO, N., "An hybrid PV-wind supply system with D-Statcom interface for a water-lift station," *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp.1387-1392, 2010.
- [29] MASDI, H.; MARIUN, N.; BASHI, S.M.; MOHAMED, A.; YUSUF, S. , "Design of a Prototype D-Statcom using DSP Controller for Voltage Sag Mitigation," *Power Electronics and Drives Systems*, 2005, vol.1, no., pp.569-574, 2005.
- [30] LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; TEODORESCU, R., "Grid Impedance Estimation via Excitation of LCL-Filter Resonance," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.43, no.5, pp.1401-1407, 2007.
- [31] BLASKO, V.; KAURA, V., "A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 33, No. 2, pp. 542-550, 1997.
- [32] GABE, I. Contribuição ao Controle de Inversores PWM Alimentados em Tensão Conectados a Rede Através de Filtro-LCL. Universidade Federal de Santa Maria, v. Dissertação de Mestrado, 2008.
- [33] LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; HANSEN, S., "Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier," *IEEE Industry Applications Conference*, vol.1, no., pp.299-307 vol.1, 2001.
- [34] GABE, I.J.; MONTAGNER, V.F.; PINHEIRO, H., "Design and Implementation of a Robust Current Controller for VSI Connected to the Grid Through an LCL Filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.24, no.6, pp.1444-1452, 2009.

- [35] TWINING, E.; HOLMES, D. G., "Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an *LCL* input filter", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 18, No. 3, pp. 888-895, 2003.
- [36] MORÁN, N.; UNDERLAND, T. M.; ROBBINS, W. P., "Power electronics: Converts, applications, and design," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 29, No. 5, pp. 969-978, 1993.
- [37] MORENO, R.M.; POMILIO, J.A.; DA SILVA, L.C.P., "Power flow control and islanding detection of a local generation system with induction generator," *Industrial Electronics*, vol., no., pp.885-891, 10-13, 2008.
- [38] SAADAT, H. Power System Analysis. v. Segunda Edição.
- [39] FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WORKMAN, L. M. Digital control of dynamic systems. v. Terceira Edição, 1998.
- [40] LISERRE, M.; DELL'AQUILA, A.; BLAABJERG, F., "Genetic algorithm-based design of the active damping for an LCL-filter three-phase active rectifier," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.19, no.1, pp. 76- 86, 2004.
- [41] CHAO LIU; ZHENGMING ZHAO; TING LU; LIQIANG YUAN, "Design and implement of an active damping LCL-filter for three-level voltage source PWM rectifier," *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, vol., no., pp.1-5, 20-23, 2011.
- [42] OGATA, K. Discrete-Time Control Systems. *Prentice Hall*, 1987.
- [43] ZMOOD, D.N.; HOLMES, D.G., "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady state error," *Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE*, vol.2, no., pp.1185-1190 vol.2, 1999.
- [44] FUKUDA, S.; YODA, T., "A novel current-tracking method for active filters based on a sinusoidal internal model for PWM invertors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.37, no.3, pp.888-895, 2001.
- [45] POH CHIANG LOH; NEWMAN, M.J.; ZMOOD, D.N.; HOLMES, D.G., "A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase UPS systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.18, no.5, pp. 1176- 1185, 2003.
- [46] HIRANO, K.; NISHIMURA, S.; MITRA, S., "Design of Digital Notch Filters," *IEEE Transactions on Communications*, vol.22, no.7, pp. 964- 970, 1974.
- [47] CARDOSO, R.; DE CAMARGO, R.F.; PINHEIRO, H.; GRUNDLING, H.A, "Kalman filter based synchronisation methods," *IET Generation, Transmission*

& *Distribution*, vol.2, no.4, pp.542-555, 2008.

- [48] INSTRUMENTS, T. DSP TMS320F28335 (Data Manual). p. Disponível em: <www.ti.com.>
- [49] SEMIKRON, “SEMISTACK: Power Electronics Systems (Datasheet),” Disponível em: <<http://www.semikron.com>>
- [50] SEMIKRON. SEMISTACK: Power Electronics Systems (Datasheet). p. Disponível em: < <http://www.semikron.com> >
- [51] _____. SKM50G123D IGBT module. p. Disponível em: <<http://www.semikron.com>>
- [52] _____. SEMIDRIVER SKHI 22 A/B: Hybrid Dual IGBT Driver (Datasheet). p. Disponível em:<<http://www.semikron.com>>
- [53] BROWN, R. G. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. *John Wiley & Sons*, v. 2 Edition, 1992.

APÊNDICE A – Descrição do Protótipo

O protótipo montado pode ser subdividido em: central de processamento, filtro *LC*, inversor, circuito de partida, rede e cargas. Na Figura 78 e na Figura 79 são apresentadas as fotos do protótipo desenvolvido. A seguir cada parte constituinte do protótipo será descrita com maiores detalhes.

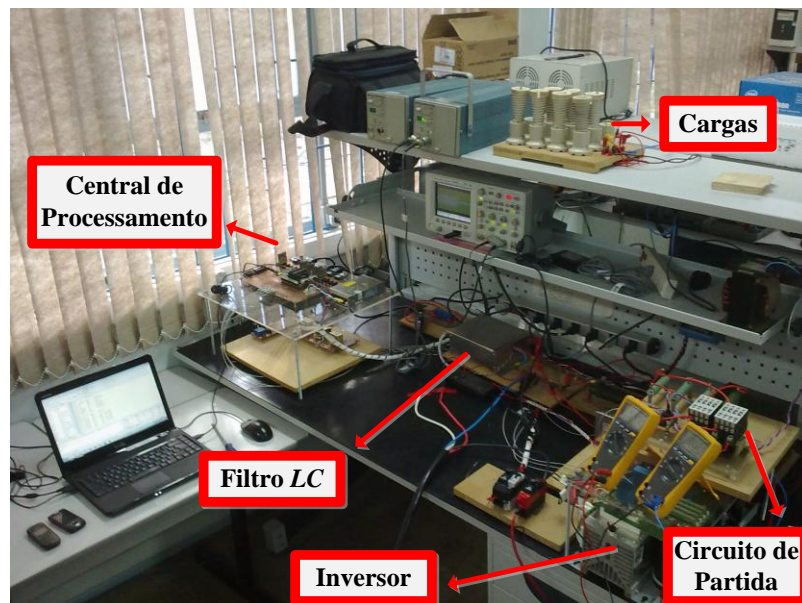


Figura 78 - Foto da bancada de trabalho

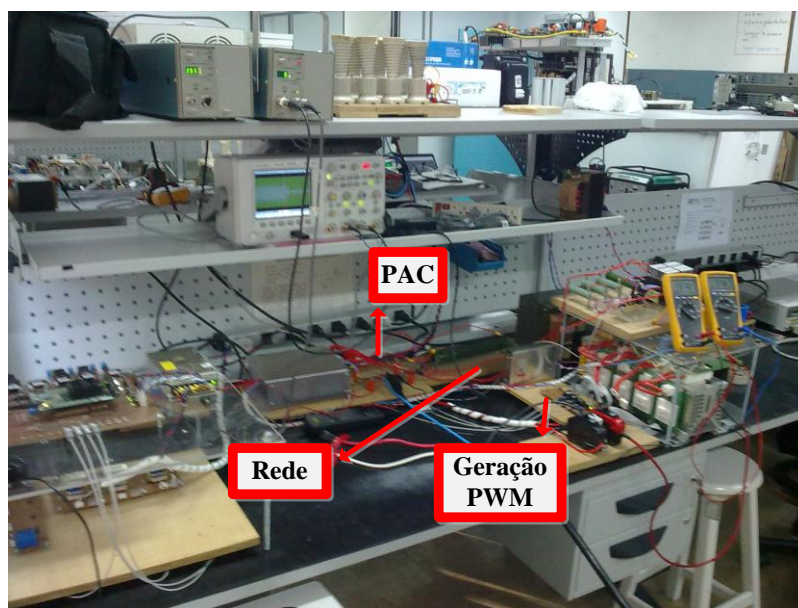


Figura 79 - Foto da bancada de trabalho

A.1 Placa Central de Processamento

Na placa da central de processamento, Figura 80, encontram-se as placas de condicionamento de sinais e o circuito de geração de referências da instrumentação, além de transmissores para fibras óticas de interface com o inversor, conector de comunicação, conector para captura de sinais e o Processador Digital de Sinais (DSP).

O kit de desenvolvimento eZdspTMF28335 produzido pela Texas Instruments, que é composto pelo controlador digital de sinais DSP TMS320F28335 [48], foi utilizado para implementar o sistema de controle. A escolha deste processador é devido a sua capacidade de processamento e também por o laboratório em que a pesquisa é desenvolvida possuir uma plataforma de interfase para o mesmo. O DSP TMS320F28335 é um microprocessador de ponto flutuante, possui 16 canais A/D de 12 bits, 88 portas que podem ser configuradas como entrada e saída, a velocidade de operação é de 150MHz, tem conexão com RS232 e USB.

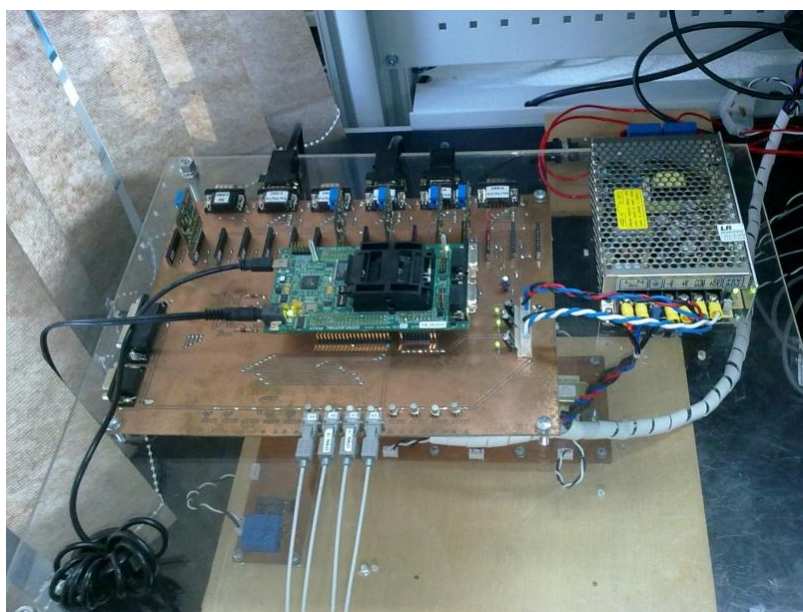


Figura 80 - Placa de processamento central

As medidas chegam das placas de aquisição, transmitidas em corrente, por meio de cabos de 8 vias e malha metálica, sendo conectadas à placa de interface por meio de conectores DB9. Cada DB9 recebe três medidas. Após esta etapa, as medidas são enviadas às placas de condicionamento, onde são convertidas novamente em tensão e recebem *offset* de 1,5 V para assim adequá-las a faixa de tensão dos canais A/D do DSP. Estas placas permitem o condicionamento de sinais contínuos e alternados, bem como a seleção de diferentes escalas

(ganhos), com a possibilidade de otimizar o canal. Das placas de condicionamento, as medidas são direcionadas às entradas dos conversores A/D do DSP.

A instrumentação necessita das tensões de referência de 1,5 V e 3 V, sendo ambas geradas na placa de processamento principal. Para a tensão de 3 V utiliza-se um circuito integrado gerador de referência LP2950-3, alimentado em 5 V pela fonte de alimentação. Esta tensão de 3 V alimenta os amplificadores *rail-to-rail* que fazem a proteção dos canais A/D nas placas de condicionamento. A tensão de 1,5 V é gerada pelo circuito integrado LM385M a partir da tensão de 3 V.

O circuito responsável pela isolação entre os circuitos de acionamentos dos interruptores do inversor e o DSP também faz parte desta placa. O objetivo desta isolação através de fibras óticas é reduzir os problemas causados por interferência eletromagnética proveniente das comutações dos interruptores. O princípio de funcionamento é simples: o sinal *PWM* na base do transistor faz com que o transistor comute o diodo emissor de luz. Dessa forma, quando o nível lógico na base do transistor for um o LED emite luz e caso contrário não emite. O transmissor utilizado é o HFBR-1524.

A.2 Circuito de Partida

O circuito aguarda o sinal da fibra ótica, quando esse comando é enviado o transistor da fibra passa a conduzir, o que causa uma queda de tensão no *gate* do transistor que alimenta todo o circuito e esse por sua vez passa a conduzir. Ao mesmo, o primeiro relé e também alimenta o restante do circuito. O Lm311 é um comparador de tensão onde os pinos 2 e 3 são alimentados pelas tensões a serem comparadas. No pino 2 esta sendo alimentado por um divisor de tensão que pode ser ajustado pelo *Trim Pot*, esse é o ajuste do tempo de contagem. Já o pino 3 é alimentado por um divisor capacitivo que ao ser alimentado começa a elevar a tensão. Quando as tensões dos pinos 2 e 3 forem iguais o pino 7 do comparador deixa de conduzir o que causa uma queda de tensão no *gate* do segundo transistor, e esse passa a conduzir. Com o segundo transistor conduzindo é acionado o segundo relé.

A qualquer momento que for retirado o sinal da fibra os relés são abertos e as tensões dos pinos dos comparadores são zeradas, a tensão do capacitor do divisor capacitivo é drenada por um diodo que está em paralelo com o resistor do divisor.

A.3 Inversor

Para a implementação utilizou-se a unidade inversora SKS25FB6U+(B2CI)2P10V12 [49] da Semikron[®], apresentada na Figura 81, a qual é composta por quatro módulos IGBTs *dual-pack* SKM50G123D [50], quatro *drives* SKHI22BH4 [51], um retificador trifásico não controlado em ponte completa e por capacitores eletrolíticos do barramento CC. Porém, dois braços do inversor foram desabilitados (sinais de comando aterrados) já que a topologia utiliza somente dois braços de interruptores.

Cada módulo de IGBTs é composto por dois IGBT's com diodos em anti-paralelo, com tensão coletor-emissor de 1200 V e corrente média de 50 A. O banco de capacitores do barramento CC é formado por quatro capacitores de 4700 $\mu\text{F}/450\text{ V}$, que são ligados como dois conjuntos de dois capacitores em paralelo, ligados em série. Assim, o banco de capacitores suporta tensões CC de até 900 V.

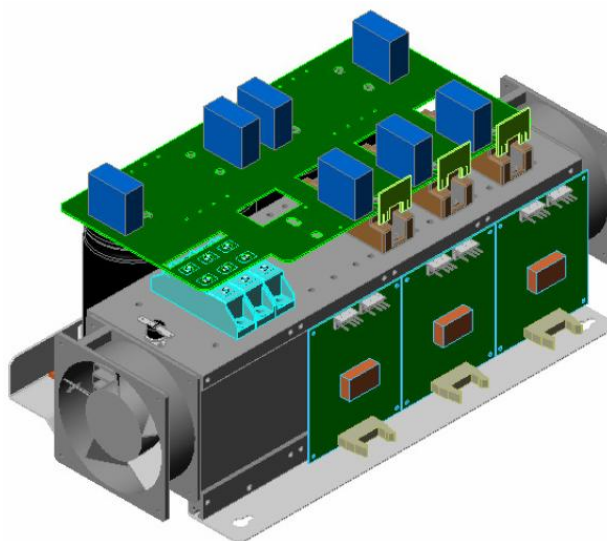


Figura 81 - Representação da unidade inversora SKS25FB6U+(B2CI)2P10V12

A.4 Filtro LC

O projeto do filtro de saída foi baseado na frequência de corte do filtro e na ondulação de corrente máxima no indutor. Considerando o cálculo da corrente de pico do sistema:

$$I_{pico} = \frac{\sqrt{2} \times P}{V_r} \quad (76)$$

Definindo a ondulação máxima de corrente como 40% do seu valor de pico, ou seja:

$$\Delta I_L = 0,4 \times I_{pico} \quad (77)$$

A frequência de corte do filtro foi definida como dez vezes menor que a frequência de comutação do inversor, ou seja:

$$f_{corte} = \frac{f_s}{10} \quad (78)$$

Após a obtenção destes parâmetros, é possível determinar a indutância e a capacitância que compõem o filtro:

$$L_f = \frac{V_{DC}}{8 \times \Delta I_L \times f_s} \quad (79)$$

$$C_f = \frac{1}{(2 \times \pi \times f_{corte})^2 \times L_f} \quad (80)$$

A.5 Tensão do barramento CC

O nível da tensão do barramento CC é dado por: sabendo que a tensão de pico da rede é 311 V, considerando que a mesma pode chegar até 15% acima desse valor (360 V) e ainda um fator de segurança de 15%, a tensão do barramento CC é de aproximadamente 420 V.

A.6 Cargas e Rede

Um conjunto de resistências de $80 \Omega/600 \text{ W}$ foi utilizado como carga, às mesmas foram conectadas de tal forma a gerarem a resistência e a potência desejada nesta implementação. A rede foi emulada através de uma indutância de múltiplos *taps*, que permite modificar o valor da indutância da rede, e uma resistência de potência, dimensionadas conforme a característica desejada, que neste caso era de rede rural com elevada impedância.

APÊNDICE B – Algoritmo de Sincronismo

O algoritmo de sincronismo utilizado nesta Dissertação é baseado na medida da tensão da rede, porém, como esta informação é obtida através de uma medida de instrumentação, a mesma pode conter ruídos, por isso, um filtro de *Kalman* é utilizado para adequar a mesma.

O filtro de Kalman é um algoritmo que considera o ruído de medida em sua formulação, tornando-se uma alternativa atraente para a extração da informação de interesse de um sinal ruidoso. Para obter as equações de Kalman considera-se o sistema dinâmico representado pelo seguinte modelo estocástico [47]:

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + \Gamma_k \gamma_k \quad (81)$$

$$y_k = F_k x_k + v_k \quad (82)$$

Onde x_k tem dimensão $n \times 1$, γ_k dimensão $y \times 1$ e y_k dimensão $r \times 1$. E γ_k e v_k são sequências de ruído branco gaussiano, não correlacionadas, com médias e covariâncias dadas por

$$E\{\gamma_i\} = 0, E\{\gamma_i \gamma_j^T\} = Q_i \delta_{ij} \quad (83)$$

$$y_k E\{v_i\} = 0, E\{v_i v_j^T\} = R_i \delta_{ij} \quad (84)$$

$$E\{v_i \gamma_i^T\} = 0, E\{\gamma_i \gamma_j^T\} = 0, E\{v_i v_j^T\} = 0, \forall i, j \quad (85)$$

Onde $E\{\cdot\}$ representa o operador matemático esperança e δ_{ij} denota a função delta de Kronecker. As matrizes Φ_k , Γ_k e F_k têm dimensões adequadas. Denotando-se por $\hat{x}_{k+1|k}$ a estimativa do vetor de estados x_{k+1} , calculado no instante de tempo t_k , a equação de filtragem é dada por [53]:

$$\hat{x}_{k+1|k} = \Phi_k \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - F_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (86)$$

Onde (87) é denominado ganho de Kalman.

$$K_k = \Phi_k P_{k|k-1} F_k^T (F_k P_{k|k-1} F_k^T + R_k)^{-1} \quad (87)$$

E (88) é a matriz de covariância dos erros de estimação do vetor x_{k+1} , calculada no instante de tempo t_k :

$$P_{k+1|k} \triangleq E \left\{ (x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k})(x_{k+1} - \hat{x}_{k+1|k})^T \right\} \quad (88)$$

Como mencionado na seção 3.5, o seno gerado para o sincronismo é composto por duas constantes: o tempo t e o ângulo θ em radianos, e também pela amplitude da tensão que é fixada em 311 V. O ângulo θ é proveniente do controle do barramento CC, já o tempo t é gerado através da tensão da rede.. Após esta etapa, o algoritmo de sincronismo detecta o cruzamento por zero desta tensão e verifica se ela está no semiciclo positivo ou no semiciclo negativo. Se estiver no semiciclo positivo, um contador é incrementado até 1/60 Hz e após é zerado, e assim sucessivamente a cada novo cruzamento. Com isso, o tempo t é gerado conforme a frequência da rede. Este funcionamento pode ser melhor observado na Figura 82.

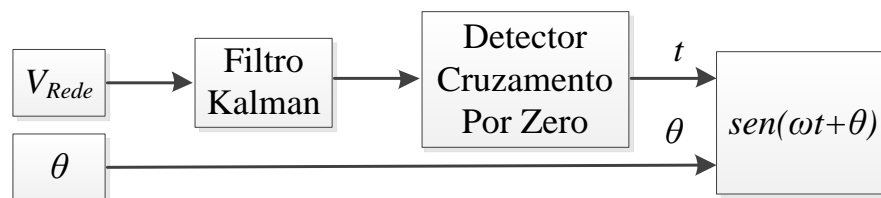


Figura 82 - Algoritmo de sincronismo